Ein Gerät zur Registrierung von Variationen des erdmagnetischen und erdelektrischen Feldes und die Bearbeitung der damit gewonnenen Meßwerte, demonstriert an zwei Stationen aus der Afarsenke

Siegfried Greinwald

1973

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546017_0078

Ein Gerät zur Registrierung von Variationen des erdmagnetischen und erdelektrischen Feldes und die Bearbeitung der damit gewonnenen Meßwerte, demonstriert an zwei Stationen aus der Afarsenke

---

Inaugural - Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

Fakultät für Geowissenschaften

der

Ludwig-Maximilians-Universität

München

vorgelegt

von

Siegfried Greinwald

Juni 1972

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

1. Berichterstatter: Prof. Dr. G. Angenheister

2. Berichterstatter: Prof. Dr. G. Hofmann

Tag der mündlichen Prüfung: 5. Juli 1972

Meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis

Einleitung 3

Kapitel I
Allgemeines
A Grundlagen der Meßmethode 5
B Notwendige Eigenschaften der Meßgeräte 8

Kapitel II
Messen und Registrieren der zeitlichen Variationen des Magnetfeldes
A Arbeitsweise und Theorie des Saturationskern-Magnetometers 11
B Aufbau des Magnetographen der Basisstation 15
a) Die Sonden 15
b) Die Oerstedtmeter 17
c) Die Trenn- und Verstärkereinheit 19
d) Die Aufzeichnung der langperiodischen Variationen 22
e) Die Aufzeichnung der Amplituden kurzer Periode auf Magnetband 24
C Bau eines transportablen, netzunabhängigen Magnetographen 27

Kapitel III
Aufzeichnung der Schwankungen des erdelektrischen Feldes mit einem netzunabhängigen Elektrographen
A Einzelheiten und Genauigkeit der Zeitmarke 35
a) Zeitmarkierung mit Hilfe der Uhr 36
b) Zeitmarke über Zeitzeichensender 37
B Elektroden
C Der Filter- und Verstärkerteil des Elektrographen 41
a) Abmessungen des Verstärkerteils und Energieversorgung 43

b) Schaltung der Meßkreise 44
D Das Magnetbandgerät 52

Kapitel IV
Wiedergabe der Registrierungen und Digitalisierung
A Digitalisierung der Magnetband-Registrierungen 56
B Veränderungen des Meßsignals durch die Digitalisierung 60
C Digitalisierung der Schreiberregistrierungen 63
D Bestimmen der Richtungen des erdelektrischen und erdmagnetischen Feldes aus den Registrierungen der unterschiedlichen Instrumente 64

Kapitel V
Auswertung von Messungen des erdelektrischen und erdmagnetischen Feldes an zwei Stationen im Bereich der Afarsenke in Äthiopien.
A Lage der Stationen 68
B Lage der Stationen zum magnetischen Äquator 70
C Auswahl der Intervalle und Trennung der Perioden durch Frequenzanalyse 71
D Die Beziehungen zwischen elektrischem und magnetischem Feld 75
E Beschreibung des Auswerteverfahrens 78
F Die Vorzugsrichtungen 82
G Ergebnisse der Auswertung 93

Zusammenfassung 99

Literaturverzeichnis 101

Danksagungen 106

Lebenslauf 107

Einleitung

Die Erkundung des oberen Erdmantels ist in den letzten Jahren in den Mittelpunkt geophysikalischer Forschung gerückt. Ein wichtiger Teil der Fragestellung gilt hierbei der Verteilung der Temperatur im Erdinneren in lateraler und vertikaler Richtung. Diese Frage mit Hilfe von Messungen des Wärmeflusses von der Erdoberfläche aus direkt zu beantworten, ist nur beschränkt möglich. Abgesehen von den durch die Sonneneinstrahlung bedingten starken Temperaturschwankungen an der Erdoberfläche, die solche Messungen nur in Bohrlöchern oder unter Tage sinnvoll erscheinen lassen, werden dieser Möglichkeit durch die geringe Wärmeleitfähigkeit der Erde prinzipielle Schranken gesetzt.

Dies möge mit folgendem Beispiel demonstriert werden: Eine "Wärmeexplosion" in einer Tiefe von 536 km, also im Erdmantel, die zur Zeit der Entstehung der Erde vor 4,5 Milliarden Jahren stattgefunden hätte, würde erst heute die Erdoberfläche erreichen (KERTZ 1969).

Dies bedeutet, daß die Messungen des Wärmestroms nur für relativ geringe Tiefen und dann nur mit einer großen zeitlichen Verschiebung Aufschlüsse über die Temperaturverteilung geben.

Unter der Voraussetzung, daß zwischen der elektrischen Leitfähigkeit σ der Gesteine und ihrer Temperatur (gilt auf Grund der Halbleitereigenschaften nur für Temperaturen von rund 800°C aufwärts) folgender Zusammenhang besteht

$$\sigma = \sum_i \sigma_i \exp(-E_i/kT)$$

σ_i =Konstanten $i \leq 3$ = Anzahl der Leitfähigkeitsmechanismen
E_i =Aktivierungsenergien
T =abs. Temperatur
k =Boltzmannkonstante

ergibt sich die Möglichkeit, mit Hilfe von Widerstands-Messungen den Temperaturverlauf im Erdinneren zu bestimmen.

Eine Methode, die Widerstands-Verteilung zu bestimmen, ist die Magnetotellurik. Sie nutzt hierzu die von der Sonne verursachten Variationen des erdmagnetischen und erdelektrischen Feldes aus.

Im Rahmen des Projekts "Oberer Erdmantel" sollten vom Institut für Angewandte Geophysik (IfAG) München Messungen mit der Methode der Magnetotellurik im Gebiet des Oberrheingrabens und der Afarsenke (Äthiopien) durchgeführt werden. Hierzu war es notwendig, Geräte zum Registrieren der Variationen des erdmagnetischen und erdelektrischen Feldes zu entwickeln und zu bauen. Dabei konnten Erfahrungen aus Messungen des Erdstroms im Gebiet der bayerischen Molasse verwertet werden. Hierbei zeigte sich, daß ein wichtiger Punkt für die Brauchbarkeit solcher Geräte ist, wie einfach sich die erhaltenen Meßkurven in digitale Werte überführen lassen, die dann auf Rechenmaschinen weiter verarbeitet werden können.

Hierbei entstand diese Arbeit. Der Leser findet im Kapitel II eine Beschreibung der Geräte zum Messen des Magnetfeldes, daran anschließend im Kapitel III eine Beschreibung der Geräte zum Messen des erdelektrischen Feldes. In dem folgenden Abschnitt werden die zur Digitalisierung notwendigen Geräte beschrieben und die dabei entstehenden Fehler abgeschätzt. Abschließend werden in Äthiopien aufgezeichnete Meßkurven gezeigt und ausgewertet.

Kapitel I

A Grundlagen der Meßmethode

Ermöglicht wird die Methode der Magnetotellurik durch die von der Sonne verursachten zeitlichen Schwankungen der Ströme in der Jonosphäre. Sie erzeugen ein induzierendes Magnetfeld $\vec{F}^e$, dem sich an der Erdoberfläche das Magnetfeld $\vec{F}^i$ der im Untergrund induzierten Ströme überlagert.

Das an der Erdoberfläche gemessene Feld $\vec{F}$ setzt sich also aus beiden Anteilen zusammen

$$\vec{F} = \vec{F}^e + \vec{F}^i \,.$$

Die Beziehungen zwischen diesen Feldern und den im Untergrund existierenden elektrischen Feldern werden beschrieben

a) durch das verallgemeinerte ohmsche Gesetz

$$j = \sigma \cdot E \qquad (1)$$

b) durch die Maxwellschen Gleichungen. Sie lauten im elektromagnetischen cgs-System:

$$\nabla \times \vec{F} = 4\pi \vec{j} + \dot{\vec{E}} \qquad (2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\dot{\vec{B}} \qquad (3)$$

mit $\vec{B} = \mu \cdot \vec{F}$

Im Rahmen der Methode der Magnetotellurik werden dabei im allgemeinen folgende Vereinfachungen eingeführt:

1.) Innerhalb und außerhalb der Erde wird mit guter Näherung die Permeabilität $\mu = 1$ gesetzt.

2.) Der Verschiebungsstrom wird vernachlässigt. Daß dies erlaubt ist, zeigt folgende Abschätzung (Vorlesung ANGENHEISTER 1968) :

Nimmt man für das induzierte Feld periodischen Verlauf an und setzt Gleichung (1) in (2) ein, so erhält man:

$$\nabla \times \vec{F} = 4\pi\sigma\vec{E}_o + i\omega\varepsilon\vec{E}_o \qquad (4)$$

Die Bedingung, die erfüllt sein muß ist dabei:

$$\frac{4\pi\sigma}{\omega\varepsilon} = \frac{4\pi\sigma T}{2\pi\varepsilon} \approx \frac{\sigma T}{\varepsilon} \gg 1 \qquad (5)$$

An der Erdoberfläche gelten dabei für die einzelnen Größen folgende Werte:

Leitfähigkeit σ: Sedimente ab $\sigma = 10^{9}\Omega^{-1}m^{-1} = 10^{-11}$ cgs
krist. Gesteine bis $\sigma = 10^{-4} - 10^{-15}\Omega^{-1}m^{-1}$
$= 10^{-15}$ cgs.

Dielektrizitätskonstante ε:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_r}{c^2} = \frac{80}{(3.10^{10})^2} \approx \frac{8}{10^{20}}$$

(gilt für Wasser).

Perioden T: T von 10^1 bis 10^5 sec.

Setzt man diese Werte in (5) ein, so ergibt sich:

$$\frac{\sigma T}{\varepsilon} = \frac{\left\{\begin{matrix}10^{-11}\\10^{-15}\end{matrix}\right\} . 10^1 . 10^{20}}{8} \approx \left\{\begin{matrix}10^9\\10^5\end{matrix}\right\}$$

Mit diesen Vereinfachungen lauten die Maxwellschen Gleichungen:

$$\nabla \times \vec{F} = 4\pi\vec{j} \qquad \nabla \times \vec{E} = -\vec{F}$$

Für eine Auswertung der Registrierungen der zeitlichen Schwankungen des erdelektrischen und des erdmagnetischen Feldes nach der Methode der Magnetotellurik ist eine Transformation in den Frequenzraum erforderlich.

Von CAGNIARD (1954) wurde eine Methode der Auswertung

für ein Modell mit einer horizontal geschichteten Erde und der Anregung durch ein räumlich homogenes Magnetfeld entwickelt. Dabei erhält man eine Größe

$$C(\omega) = \frac{E_x}{i\omega F_y} \quad ,$$

die einer Schwerpunktstiefe des induzierten Stromsystems entspricht (SCHMUCKER 1969).

Für den geschichteten Halbraum läßt sich hieraus eine scheinbare Eindringtiefe

$$p_s = \sqrt{2}\,|C(\omega)|$$

und ein scheinbarer spezifischer Widerstand

$$\varrho_s = 2\pi\omega p_s^2 = 2T\left|\frac{E_x(\omega)}{F_y(\omega)}\right|^2 \quad \text{(cgs-Einh.)}$$

berechnen.

Im Fall des homogenen Halbraums ist die scheinbare Eindringtiefe gleich der wahren Eindringtiefe und der scheinbare spezifische Widerstand ϱ_s gleich dem spezifischen Widerstand ϱ. Beim Übergang zum praktischen Maßsystem erhält man dann die bekannten Formeln

$$p_s = p = \frac{1}{2\pi}\sqrt{10\varrho T}$$

$$\varrho = \varrho_s = 0{,}2\,T\left|\frac{E_x(\omega)}{F_y(\omega)}\right|^2$$

p, p_s = Eindringtiefe in km,
ϱ, ϱ_s = spez. bzw. scheinb. spez. Widerstand in Ωm,
T = Periodendauer in Sekunden,
E_x = elektr. Feldstärke in mV/km,
F_y = magn. Feldstärke in γ.

Die Eindringtiefe ist also bei gegebener Widerstandsverteilung eine Funktion der Periode. Aus der Perioden-Abhängigkeit des scheinbaren spez. Widerstandes läßt sich bei horizontal geschichtetem Halbraum dann die Leitfähigkeit als Funktion der Tiefe ermitteln.

Will man also eine detaillierte Aussage über die Widerstandsverteilung im Untergrund bis in möglichst große Tiefen erhalten, muß man das erdelektrische und das erdmagnetische Feld in einem möglichst weiten Periodenbereich messen und aufzeichnen.

B. Notwendige Eigenschaften der Meßgeräte.

Welche Voraussetzungen müssen nun die Meß- und Aufzeichnungsgeräte besitzen, um die genannten Forderungen zu erfüllen?

Abbildung 1 zeigt das mittlere Periodenspektrum der geomagnetischen Variationen von H im Periodenbereich von 10 bis 5000 sec. Diese Werte wurden von ANGENHEISTER (1954) aus Pulsations- und Hauptregistrierungen am Institut für Geophysik in Göttingen in den Jahren 1952/53 ermittelt und dürften angenähert auch für die übrigen Gebiete mittlerer Breiten gültig sein. Danach zeigen die Amplituden der erdmagnetischen Variationen eine starke Periodenabhängigkeit, die in dem hier gezeichneten Perioden-Intervall ein Verhältnis von 1:100 erreicht.

Da die Amplituden der Frequenzen sich überlagern und noch zusätzlich längere Perioden existieren, so muß der zu fordernde Meßbereich größer sein als das hier angegebene Intervall.

Gleichzeitig müssen auch die kurzen Perioden mit genügender Genauigkeit aufgezeichnet werden. Beschränkt man sich auf kürzeste Perioden von 10 sec, so sollte der kleinste meßbare Wert des Gerätes etwa gleich 0,1 γ sein, andererseits auch eine Amplitude von $\pm$ 100 γ das Meßgerät nicht übersteuern

Die Aufzeichnung der Variationen des erdelektrischen Feldes bereitet in dieser Hinsicht geringere Schwierigkeiten. Durch die Induktion werden die Amplituden der kurzen Perioden vergrößert, die der langen verkleinert und damit die periodenabhängigen Amplitudenunterschiede verringert. Deutlich ist dies in Abbildung 2 zu erkennen. Hier wurde ein mittleres Amplitudenspektrum des erdelektrischen Feldes gezeichnet, gültig für einen homogenen Halbraum von 1 Ωm und von 50 Ωm. Die Werte für die Variationen des magnetischen Feldes wurden Abbildung 1 entnommen. Das Amplitudenverhältnis der kürzesten zu den längsten Perioden beträgt hier nur noch 1:5.

Dafür zeigt das elektrische Feld starke Amplitudenunterschiede als Funktion der Leitfähigkeit und damit des Ortes. Sie lassen sich jedoch durch eine hohe Empfindlichkeit und eine in weiten Grenzen variable Verstärkung ausgleichen.

Faßt man die hier angeführten Überlegungen zusammen, so müssen für die Meßgeräte folgende Forderungen aufgestellt werden:

a) für das Magnetfeldmeßgerät
   1. eine Empfindlichkeit von 0,1 γ oder besser
   2. eine Dynamik (= ausnützbarer Amplitudenmeßbereich) von 1:1000 (=60 dB) oder mehr

b) für das E-Feldmeßgerät
   1. eine möglichst hohe Empfindlichkeit
   2. eine in weiten Grenzen einstellbare Verstärkung.

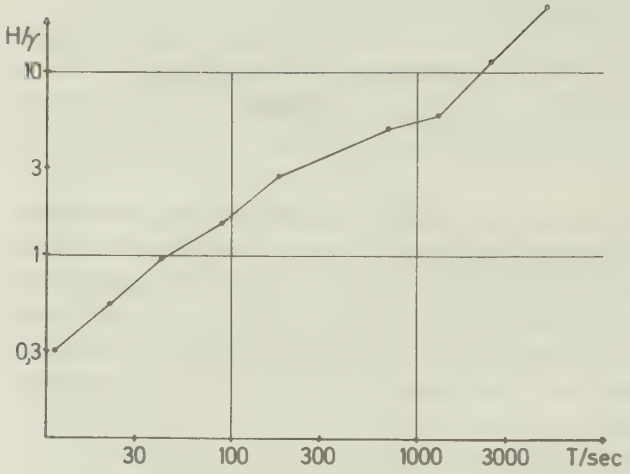

Abb. 1 Mittleres Amplitudenspektrum der H-Variationen nach ANGENHEISTER.

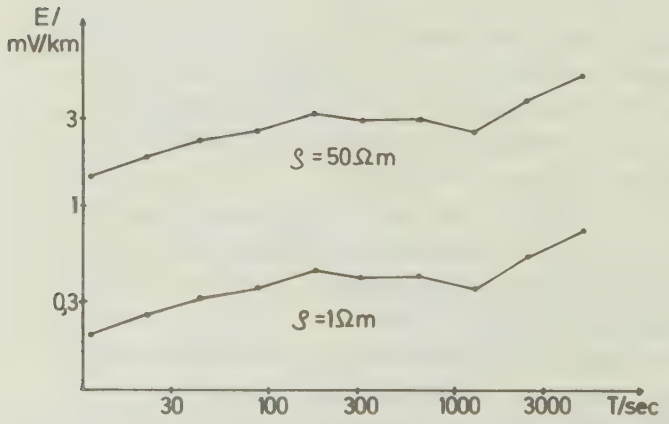

Abb. 2 Mittleres Amplitudenspektrum des erdelektrischen Feldes berechnet für den homogenen Halbraum mit dem spez. Widerstand ρ nach dem mittleren Amplitudenspektrum des Magnetfeldes von Abb. 1

Kapitel II

A Arbeitsweise und Theorie des Saturationskern-Magnetometers.

Ein Meßgerät, mit dem es gelingt, die im vorhergehenden Kapitel genannten Forderungen im Hinblick auf Magnetfeldmessungen zu erfüllen, ist das Saturationskern-Magnetometer. Dieses Magnetometer arbeitet ohne mechanisch bewegte Teile und erlaubt es, Magnetfelder in ihren Komponenten zu messen. Es wurde zum ersten Male von ASCHENBRENNER und GOUBAU 1936 an der Technischen Hochschule zu München eingesetzt, um möglicherweise auftretende hochfrequente Schwankungen des Erdfelds zu erkennen. Damals war es noch nicht möglich, die zur Registrierung längerer Schwingungen notwendige Konstanz der Meßapparatur zu erreichen. Inzwischen hat man die Technik dieser Geräte jedoch weiterentwickelt und es ist daher heute möglich, mit diesen Geräten die Pulsationen und Variationen des Erdmagnetfeldes zu registrieren.

Diese Geräte arbeiten nach folgendem Prinzip:
Ein hochpermeabler Kern ist von zwei Spulen umgeben. Die eine Spule dient als Erregerwicklung und wird mit Hilfe eines Oszillators mit einer möglichst reinen Sinuswelle angeregt. Hierbei wird der hochpermeable Kern durch das Magnetfeld der Erregerspule in beiden Richtungen bis in die Sättigung durchgesteuert. In der zweiten Spule, die ebenfalls den Kern umschließt, wird dadurch eine Wechselspannung der gleichen Grundperiode induziert, die jedoch zusätzlich die dritte und höhere ungerade Harmonische enthält. Diese entstehen durch die Sättigung des Kernmaterials bei höherer Aussteuerung.

Liegt nun zusätzlich ein Gleichfeld in Richtung der Spulenachse an, so überlagert sich dies dem von der Erregerspule erzeugten Feld. Hierdurch wird die Symmetrie der in der Meßwicklung induzierten Spannung gestört und es entstehen neben den ungeraden auch die zweite und höhere gerade Harmonische. Die Amplitude aller geradzahligen Harmonischen ist hierbei dem anliegenden Gleichfeld proportional.

Schaltet man zwei Einzelsonden hintereinander, bei denen die Erregerspulen gegensinnig gewickelt sind, die Meßspulen jedoch gleichsinnig, so erhält man eine Doppelsonde und erreicht, daß die ungeradzahligen Harmonischen der beiden Sonden sich auslöschen, die geradzahligen sich durch Addition verstärken. Dies erleichtert die Aussiebung der zweiten Harmonischen, die heute in allen Saturationskern-Magnetometern als Indikator der Feldstärke verwendet wird.

Nimmt man nach FELDTKELLER (1943) für die Form der Magnetisierungskurve des Kernmaterials eine Approximation durch einen Linienzug und sich anschließende Sinusbögen an (siehe Abb.3), so ergibt sich für eine Doppelsonde, deren Ausgangsspannung aus den Einzelspannungen der beiden Einfachsonden zusammengesetzt ist, bei Erregung mit dreiecksförmiger Wechselspannung für die zweite Harmonische folgende Formel:

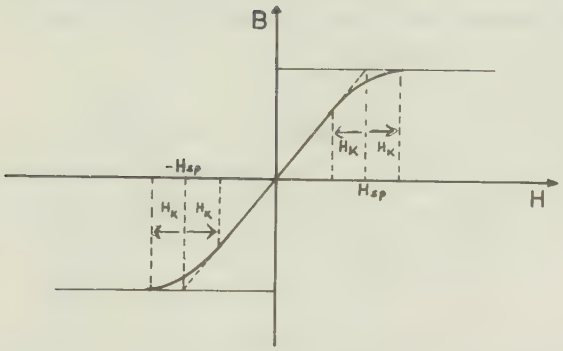

Abb. 3 Approximation der Magnetisierungskurve des Kerns nach FELDTKELLER (1943).

$$u_2 = \omega \cdot w \cdot F \cdot \mu_K \cdot \hat{H}_1 \cdot \sin \frac{2H_o}{\hat{H}_1} \cdot h_2 \quad \text{mit}$$

$$h_2 = 4/\pi \cdot \sin \frac{2H_{sp}}{\hat{H}_1} \cdot \frac{\cos \frac{\beta H_{sp}}{\hat{H}_1} \cdot \frac{H_k}{H_{sp}}}{1 - (2/\pi \cdot \frac{\beta H_{sp}}{\hat{H}_1} \cdot \frac{H_k}{H_{sp}})^2};$$

u_2 = Ausgangsspannung der zweiten Harmonischen
w = Windungszahl der Spule
ω = Kreisfrequenz der Erregerspannung
F = Kernquerschnitt
μ_k = Permeabilität des Kerns
H_1 = Scheitelwert der Erregerfeldstärke
H_o = Amplitude des zu messenden Gleichfeldes in Richtung der Spulenachse
H_k = Krümmungsfeldstärke (siehe Abb.3)
H_{sp} = Pseudosättigungsfeldstärke (siehe Abb.3)

Faßt man alle in einem Gerät durch die Konstruktion und die Abmessungen der Sonde festgelegten Werte zu einer Konstanten K zusammen

$$K = \omega \cdot w \cdot F \cdot \mu_K \cdot \hat{H}_1 \cdot h_2$$

so ergibt sich für die Ausgangsspannung u_2 der zweiten Oberwelle folgende vereinfachte Formel:

$$u_2 = K \cdot \sin \frac{2H_o}{\hat{H}_1} ;$$

Es zeigt sich, daß für Feldstärken H_o, die klein sind gegenüber dem Scheitelwert der Erregerfeldstärke $\hat{H}_1$, die Amplitude der zweiten Harmonischen praktisch dem anliegenden Feld proportional ist.

In der technischen Ausführung wird die zweite Oberwelle u_2 mittels Resonanzfilter aus dem an der Sekundärspule anstehenden Frequenzgemisch herausgesiebt, anschließend durch einen phasenempfindlichen Verstärker gleichgerichtet und auf den zur Anzeige notwendigen Pegel verstärkt. Durch die phasenempfindliche Gleichrichtung gelingt es, zusätzlich zum Betrag der Feldstärke auch die Richtung durch das Vorzeichen der Ausgangsspannung des Gerätes zu ermitteln. Dabei wird die Komponente in Spulenachsenrichtung erfaßt.

B Aufbau des Magnetographen der Basisstation

In der hier zu beschreibenden Basisstation für die Feldmessungen werden Saturationskern-Magnetometer der Firma Förster, Reutlingen eingesetzt. Der benutzte Gerätetyp 1.104 EF ist noch mit Röhren bestückt und nimmt 80 Watt auf. Diese hohe Leistungsaufnahme erfordert Netzanschluß und schränkt somit den Einsatz der Geräte auf "elektrifizierte" Gegenden ein.

Die Station registriert nur die beiden horizontalen Komponenten H und D. Der Einbau der dritten Komponente Z ist jedoch vorgesehen. In den folgenden Abschnitten sollen die einzelnen Bauteile erläutert und beschrieben werden.

a) Die Sonden

Die drei Sondenpaare für die Messung der drei Komponenten H, D und Z sind in einem gemeinsamen zylindrischen Aluminiumgehäuse von ca. 10 cm Durchmesser und 20 cm Höhe wasserdicht untergebracht (= Sondentripel Bs-xyz-4). Die einzelnen Sondenpaare sind darin senkrecht zueinander justiert und zwar zeigen die positiven Richtungen der H-Sonde nach Norden, der D-Sonde nach Westen und der Z-Sonde nach Unten. Die Sonde muß mit großer Genauigkeit aufgestellt werden. Voraussetzung sind eine stabile Halterung und ein fester Untergrund. Notfalls muß an der gewünschten Stelle eben ein kleiner Betonsockel zementiert werden.

Die Halterung wurde von der Werkstatt des IfAG gebaut und besteht aus einem 15 kg schweren, runden Aluminiumteller von 45 cm Durchmesser. Er

ruht auf drei Metallfüßen, die zur Horizontierung in der Höhe verstellbar sind. Die horizontale Lage kann an zwei fest eingebauten Präzisionslibellen kontrolliert werden. Am Außenrand des Sondenhalters ist ein Schneckentrieb angebracht, der es ermöglicht, die Sonde auf zwei Bogenminuten genau in die gewünschte Richtung zu drehen. Als Richtungsanzeige dient dabei der Ausschlag des D-Magnetometers. Die notwendige Ausrichtung ist erreicht, wenn die Amplitude der D-Komponente minimal geworden ist.

Daß ein solch genaues Ausrichten nach magnetisch EW auf zwei Bogenminuten nicht in erster Linie erforderlich ist, um die Komponenten H und D richtig zu erfassen, sondern um den Betrag des konstanten Erdfeldes in der EW-Komponente genügend klein zu halten, zeigt folgende Überlegung: Sei die Horizontalintensität, wie es für mittlere Breiten gültig ist, ca. 20 000γ und D exakt auf Null abgeglichen, so gilt für ein neues D_x, das durch Drehen der Sonde um einen Winkel φ entsteht:

$$D_x = H_o \cdot \sin\varphi = 20\,000 \cdot \sin\varphi\,;$$

bei einer Drehung um ein Grad ergibt sich so ein neuer Meßwert $D_x = 20\,000 \cdot \sin 1^o = 350\gamma$, ein Betrag der weit außerhalb des benutzten Meßbereiches liegt. Bei einer Verkippung ist in mittleren Breiten der Fehler sogar doppelt so groß ($Z \approx 40\,000\gamma$).

Das Sondenrauschen, das die Genauigkeit der Messung im kurzperiodischen Spektrum begrenzt, liegt bei 0,1 bis 0,2γ. Die absolute Genauigkeit ist jedoch sehr viel geringer, da durch kurzzeitiges Einwirken eines starken Feldes - es genügt die Stärke

des Erdfeldes wie es beim Abschalten oder bei Netzausfall und dem damit verbundenen Ausfall der Kompensation in der H- und Z-Komponente erfolgt - daß der Sondennullpunkt um 1 bis 2γ verschoben werden kann (persönliche Mitteilung von K. WIENERT).

b) Die Oerstedtmeter

Die Oerstedtmeter, die die elektronischen Zusatzteile wie den Oszillator, den phasenempfindlichen Gleichrichter und das Anzeigegerät enthalten, werden in einigen Metern Abstand von den Sonden aufgestellt. Dadurch können Störungen am Ort der Sonde, die beim Bedienen des Geräts und durch Streufelder der 50 Hz Netzspannung entstehen, verhindert werden.

Die Empfindlichkeit des Geräts läßt sich mittels eines Wahlschalters zwischen $\pm 10^5\gamma$ und $\pm 10^2\gamma$ Vollausschlag einstellen. Um die gewünschte Auflösung zu erhalten, muß der empfindlichste Meßbereich (= $\pm 100\gamma$) verwendet werden. Nach Auskunft der Firma Förster kann dabei der Bereichsendwert ohne Verlust an Linearität bis zu 50% überschritten werden.

Eine Voraussetzung um den empfindlichsten Meßbereich einschalten zu können ist, daß in der H- und Z-Komponente der konstante Anteil des Erdfeldes vorher kompensiert wird. In der D-Komponente ist dies bereits durch genaues Ausrichten in EW-Richtung geschehen. Dazu tragen die Sonden Kompensationswicklungen, die aus dem Erdfeld-Kompensationseinschub gespeist werden und am Ort der Sonde ein genau einstellbares Gegenfeld erzeugen. Die Stabilität des Kompensationsfeldes liegt im gesamten Bereich von 0 bis 50 000 bei 0,002% des Endwertes, also unter $\pm 1\gamma$. Der Temperaturgradient beträgt $0{,}15\gamma/^{\circ}C$.

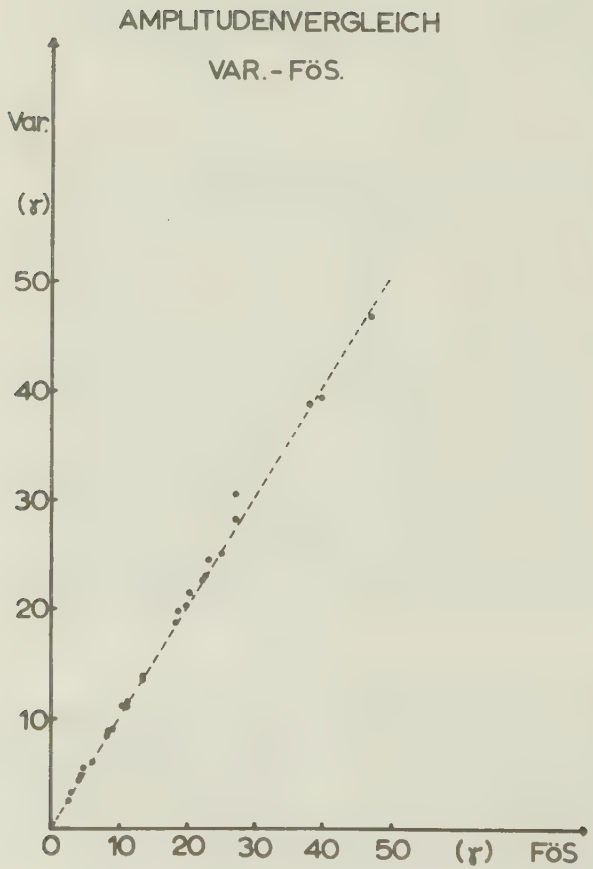

Abb. 4 Überprüfen der Linearität der Förstersonde durch Vergleich gleichzeitiger Registrierungen eines Askania-Variographen und einer Förstersonde.

Diese Kompensation ließe sich auch durch eine Anordnung von Magneten erreichen. In diesem Fall müßte jedoch ein großer räumlicher Abstand zwischen den Sonden der einzelnen Komponenten eingehalten werden, um eine gegenseitige Beeinflußung zu verhindern. Dies würde die räumliche Ausdehnung vergrößern und die Einsatzmöglichkeiten einschränken.

Zur Kontrolle der Empfindlichkeit besitzt das Gerät eine fest eingebaute Eichvorrichtung. Mit Hilfe eines genau definierten Gleichstroms, der zusätzlich durch die Meßwicklung geschickt wird, läßt sich am Ort der Sonde ein Feld erzeugen, das jeweils dem Vollausschlag des gerade eingestellten Meßbereiches entspricht. Der Verstärkungsfaktor des Geräts läßt sich dann auf den geforderten Wert abgleichen. Der Einfluß unterschiedlicher Kabellängen zwischen Sonde und Gerät und verschiedener Sondenempfindlichkeit wird so ausgeglichen.

c) Die Trenn- und Verstärkereinheit.

Die Aufzeichnung der zeitlichen Magnetfeldschwankungen auf im Gelände einsetzbaren, transportablen Geräten, bereitet wegen des großen Amplitudenumfanges dieser Variationen einige Schwierigkeiten. So besitzen die von uns eingesetzten Magnetbandgeräte nur eine Dynamik von 40 dB, benötigt werden jedoch 60 dB. Glücklicherweise läßt sich die in Abb. 1 gezeigte, starke Abhängigkeit der Amplituden des Magnetfeldes von der Periode hier ausnützen. Sie ermöglicht, den gesamten Frequenzbereich durch Filter in zwei getrennte Abschnitte aufzuteilen und jeden für sich mit unterschiedlicher Verstärkung und verringertem Amplitudenumfang zu

registrieren. Dazu wurde ein Trenn- und Verstärkerteil entwickelt, der die Aufspaltung in die beiden Kanäle und gleichzeitig die notwendige elektrische Anpassung an die Registriergeräte vornimmt.

Dieses Gerät (siehe das Blockschaltbild Abb. 5) besteht aus drei Einschüben, einem Versorgungsteil und den identisch aufgebauten Meßkanälen für die beiden Komponenten H und D. Die Einschübe sind in einem Gehäuse mit den Abmessungen 45 x 30 x 20 cm untergebracht. Wegen des gleichen Aufbaues der Meßkanäle genügt es, sich in der Beschreibung auf einen zu beschränken.

Am Eingang der Meßkreise liegt die von den Oerstedtmetern gelieferte analoge Ausgangsspannung an. Sie schwankt zwischen 0 und ± 1,5 V und ist dem anliegenden Feld proportional. Ein Gleichstromtransformator im Eingang des Meßkreises erlaubt es, den nicht auf Masse liegenden Kathodenfolgerausgang des Oerstedtmeters potentialfrei anzuschließen. Am Ausgang des Trenntransformators wird das Signal für den langperiodischen Frequenzbereich (>1000 sec) abgenommen, der auf Papierschreiber registriert wird. Gleichzeitig wird, um den zweiten Registrierkanal für die kurzperiodischen Schwankungen mit kleinen Amplituden abzutrennen, das Ausgangssignal des Gleichstromtransformators einem Hochpaßfilter zugeführt. Dieses ist ein einstufiges RC-filter, welches mittels eines Drehschalters auf die Bezugsperioden 1200, 1800 oder 2400 sec eingestellt werden kann. Das Ausgangssignal des Filters, in dem nun die langen Perioden in ihrer Amplitude stark abgeschwächt sind, gelangt an den Eingang eines Operations-Verstärkers. Über eine kontinuierlich einstellbare Verstärkung

MAGNETOGRAPH

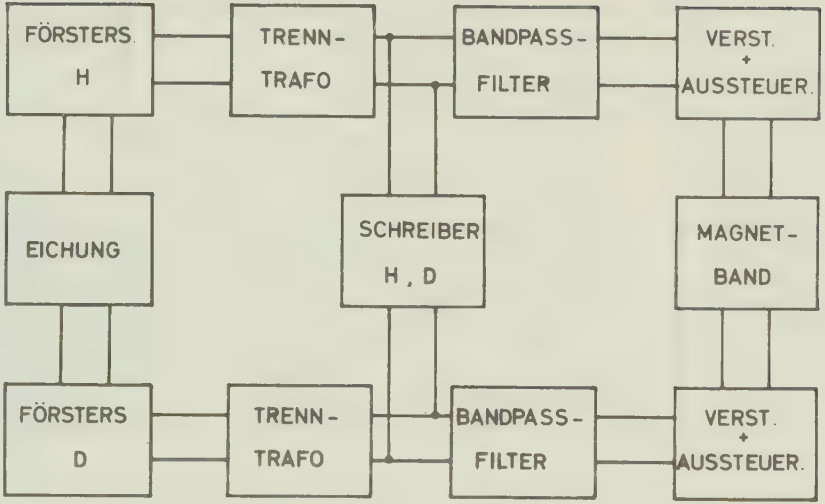

Abb. 5 Blockschaltbild des Magnetographen zur Registrierung der zeitlichen Schwankungen des Erdmagnetfeldes.

werden dann die Amplituden soweit angehoben, daß sie die Meßkanäle des zur Registrierung dienenden Magnetbandspeichers aussteuern können. Da sich durch eine Einengung des Frequenzbereiches das Rauschen des Oerstedtmeters noch verringern läßt, unterdrückt eine frequenzabhängige Gegenkopplung Perioden kürzer als 5 sec. Dies stellt jedoch keine Einengung des registrierbaren Periodenintervalles dar, da die Amplituden der natürlichen Schwankungen des Magnetfeldes bei Perioden kleiner als 5 sec sowieso unterhalb des Rauschpegels des Meßgerätes liegen.

Wie kann nun die Amplitude der Aufzeichnungen in beiden Registrierkanälen bestimmt werden?
Dazu wird die in die Oerstedtmeter eingebaute Eichvorrichtung benutzt. Ein Schalter setzt das Eichfeld, das am Ort der Sonde dem vorhandenen Feld überlagert wird, soweit herab, daß die Eichamplitude innerhalb des vorgesehenen Registrierbereichs bleibt. Dazu genügt es, den Eichstrom durch Parallelschalten geeigneter Widerstände auf den gewünschten Wert herabzusetzen. Die Amplitude des so erhaltenen Eichung läßt sich sehr leicht durch Ausmessen des Eichstroms und Vergleich mit dem zum Vollausschlag gehörenden Wert ermitteln. Diese Eichung wird mit Hilfe einer Uhr alle vier Stunden während der Registrierung für ca. 30 sec eingeschaltet.

d) Die Aufzeichnung der langperiodischen Variationen.

Die Aufzeichnung der langperiodischen Variationen geschieht mit einem Dreikanal-Kompensationsschreiber auf Papier. Da von diesen Registrierungen nur Perioden länger als 1000 sec ausgewertet werden

Abb. 6 Wiedergabe der Aufzeichnung der langperiodischen Variationen auf Papier in ca. 1/10 nat. Größe.

Das Beispiel stammt von der Station KEMBOLCHA und zeigt den typischen Verlauf des Elektrojets. Die Zeitskala erstreckt sich von 4^{00}UT ($=7^{00}$ET) bis 21^{00}UT ($=24^{00}$ET) am 9. 3. 1971.
Die Ausschläge um 4^{30}, 8^{30} und 12^{30} sind Eichausschläge mit einer Amplitude von 4,2 γ. Die Empfindlichkeit von H ist rund halb so groß wie die von D.

sollen, wurde ein Papiervorschub von 12 cm/h gewählt. Zwei der drei Registrierkanäle dienen zum Aufzeichnen der beiden Komponenten H und D, während auf dem dritten Kanal die Zeitmarkierung erfolgt. Bei dem hier gewählten Vorschub genügen dabei Stundenmarken. Siehe hierzu Abb. 6, die die photographische Widergabe einer Orginalregistrierung in ca 1/10 natürlicher Größe zeigt.

Das registrierte Signal entspricht der Ausgangsspannung der Oerstedtmeter. Eine eigene Aussiebung der kurzen Perioden ist wegen der natürlichen Amplitudenabnahme nicht erforderlich. Amplituden und Phasen sind bei dieser Registrierung nicht von der Periode abhängig. Die Amplitude kann am Schreiber kontinuierlich eingestellt und so der erwartbaren Aktivität des Magnetfeldes angepaßt werden. So wurde für die H-Komponente bei Registrierungen in Äthiopien, wo ein starker Tagesgang auftritt, ein Ausschlag von 200 γ für die volle Schreibbreite gewählt, während in mitteleuropäischen Breiten eine Amplitude von 120 γ für die Schreibbreite ausreichen.

e) Die Aufzeichnung der Amplituden kurzer Periode auf Magnetband.

Im Gegensatz zu den eben erwähnten Registrierungen entstehen bei den Aufzeichnungen der kurzperiodischen Variationen starke Amplituden- und Phasenänderungen. Diese sind zwangsläufig durch die zur Abtrennung notwendigen Filter bedingt. In Abb. 7 sind die Amplitudenänderungen, in Abb. 8 die Phasenverschiebungen als Funktion der Periode aufgetragen, die bei der Registrierung der kurzen Perioden auftreten. Die hier gezeigte Kurve gilt für ein Hochpaßfilter mit einer Bezugsperiode

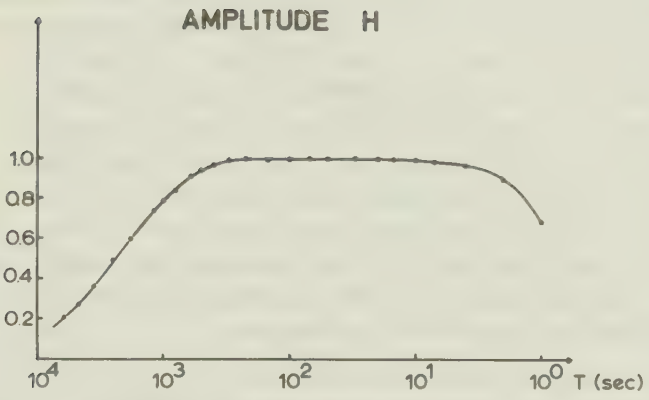

Abb. 7 Amplituden-Durchlaßkurve des Registrierkanals für kurze Perioden

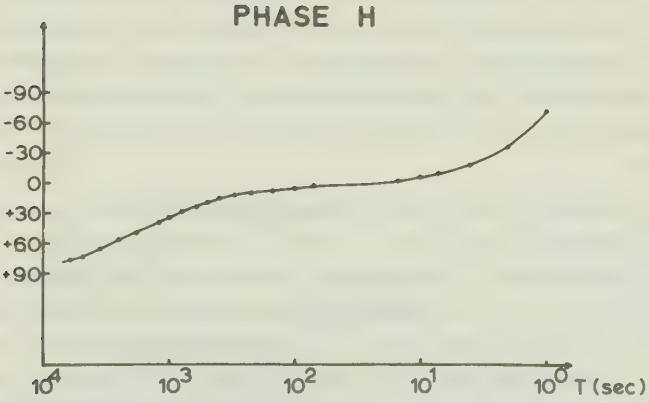

Abb. 8 Phasendurchlaßkurve des Registrierkanals für kurze Perioden

von 1200 sec. Die Registrierung der beiden Komponenten H und D erfolgt auf zwei Spuren eines siebenspurigen analogen Magnetbandes. Die Empfindlichkeit der Registrierkanäle, die sich im Verstärkerteil kontinuierlich einstellen läßt, muß dabei so gewählt werden, daß einerseits die volle Empfindlichkeit des Magnetfeldmeßverfahrens nicht durch zusätzliches Bandrauschen verringert wird, andererseits ein möglichst großes Amplitudenintervall ohne Überschreiten des nutzbaren Registrierbereiches aufgezeichnet werden kann.

Da das benutzte Magnetbandgerät nur eine Dynamik von 40 dB, entsprechend einem Amplitudenverhältnis von 1:100 besitzt, sind hier enge Grenzen gesetzt. Die Vollaussteuerung wurde für die Registrierung der kurzen Perioden auf $\pm 7\gamma$ gestellt. Bei der erwähnten Dynamik entspricht dann das Bandrauschen einem Magnetfeldrauschen von $\pm 0{,}07\gamma$, das sicher kleiner ist als das Sondenrauschen. Bei dieser Einstellung läßt es sich nicht vermeiden, daß größere Amplituden vorwiegend längerer Perioden die Registrierung übersteuern. Solche Zeiträume müssen dann eben bei der Auswertung unberücksichtigt bleiben oder gegebenenfalls vom Papierschrieb digitalisiert werden.

Beide Registrierkanäle zusammen ergeben so ein Amplitudenintervall von $\pm 0{,}07\gamma$ (Rauschen des Magnetbandgeräts) bis $\pm 100\gamma$ (Vollausschlag des Schreibers). Die in Kapitel I geforderte Dynamik von 60 dB wurde damit auf alle Fälle erreicht. In Kauf genommen werden müssen dafür Amplituden- und Phasenänderungen, die durch das die Registrierbereiche trennende Hochpaßfilter verursacht werden.

C Bau eines transportablen, netzunabhängigen Magnetographen.

An der bisher beschriebenen Station werden Oerstedtmeter eingesetzt, die noch mit Röhren bestückt sind. Die Geräte sind durch ihre Größe unhandlich und wegen des hohen Verbrauchs auf Netzanschluß angewiesen. Die Orte, an denen diese Geräte eingesetzt werden können, liegen daher in "elektrifizierten" Gebieten. Gerade dort jedoch ist es schwierig, das erdmagnetische Feld zu messen, da fahrende Autos oder vagabundierende technische Wechselströme Störungen bewirken.

Aus diesem Grunde wurde versucht, ein Batteriebetriebenes Oerstedtmeter zu bauen. Neuerdings wird von der Firma Förster ein transistorisierter Nachfolgetyp des bisher verwendeten Gerätes angeboten, das einschließlich zweier Erdfeld-Kompensationseinschübe nur noch 8 Watt verbraucht. Diese geringe Leistungsaufnahme ermöglicht es, das Gerät aus Batterien zu betreiben. Voraussetzung dafür ist, daß es gelingt, alle drei Komponenten mit Hilfe eines einzigen Oerstedtmeters abzutasten. Über die Entwicklung eines solchen Gerätes möchte ich hier berichten.

Für ein solches Gerät werden folgende Teile benötigt:

1. Eine Dreifachsonde mit Kompensations-Wicklungen zum Messen der drei Komponenten
2. Ein Oerstedtmeter
3. Zwei Kompensationseinschübe zur Kompensation des Hauptfeldes in H und Z
4. Ein Registriergerät für die drei Komponenten.

Bevor der Umschaltmechanismus diskutiert wird, soll zuerst ein Blick auf das geplante Registrierverfahren geworfen werden.

Am einfachsten wäre es, digitale Werte zu registrieren, und zwar jeweils dann, wenn eine bestimmte Komponente an das Oerstedtmeter angeschlossen ist. Da digitale Registriergeräte zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht für einen Geländeinsatz zur Verfügung stehen, müssen hierfür ein batteriebetriebener Schreiber oder ein analoger Magnetbandspeicher eingesetzt werden. Gleichzeitig muß aus den zeitlich getrennten Meßintervallen jeder Komponente ein kontinuierliches Signal erzeugt werden.

Dies ist auf folgende Weise mit dem geringsten technischen Aufwand zu meistern: Mit einem Tiefpaßfilter geeigneter Zeitkonstante werden die Meßintervalle jeder Komponente zu einem kontinuierlichen Signal integriert. Dabei müssen jedoch zwei Punkte beachtet werden: Zum einen geht nun neben der Amplitude des Meßwerts auch die Einschaltdauer als Meßgröße in die Registrierung ein, zum anderen muß die Umschaltfrequenz wesentlich größer sein als die höchste zu registrerende Frequenz.

Als Schaltfolge wurde ein Umschaltperiode von 1 sec gewählt. In diesem Zeitraum wird jeder Meßkreis für ca. 1/3 sec an das Oerstedtmeter angeschlossen. Da die Einstellzeit des Meßgeräts etwa gleich 1/100 sec ist, genügt die gewählte Meßzeit von 1/3 sec mit Sicherheit für eine einwandfreie Ablesung. Andererseits ist auch der Abstand zur kürzesten noch zu registrierenden Periode von 15 sec groß genug, um eine einwandfreie Ausfilterung der Umschaltperiode zu ermöglichen.

Um beim erstgenannten Punkt, der konstanten Umschaltzeit, die geforderte Genauigkeit zu erreichen, wird ein Quarz als Zeitgeber eingesetzt. Die Eigenfrequenz dieses Quarzes von 10^5 Hz wird durch binäre Teiler auf 100 Hz herabgeteilt, um einen Zähler anzusteuern, der von 0 bis 99 zählt, sich selbsttätig auf Null zurückstellt und erneut beginnt. Mit Hilfe dieses fest programmierten Zeitgliedes werden nun die einzelnen Komponenten hintereinander an das gemeinsame Oerstedtmeter gelegt.

Welche Teile müssen nun umgeschaltet werden? Eigentlich wärendie Feldspule für die Erregerfrequenz, die Meßspule für die zweite Harmonische und der Ausgang für die dem Magnetfeld proportionale Gleichspannung jeder Komponente umzuschalten. Bei ersten Versuchen zeigte sich jedoch, daß das Umschalten des Sondenstroms, also der Erregerspule zu ungünstigen Ergebnissen führt. Bedingt durch die Induktivität der Spule und des Kabels treten beim An- und Abschalten des Sondenstroms Spannungsspitzen auf, die zu einer Nullpunktsverlagerung der Sonde führen. Durch eine Synchronisation der Umschaltzeitpunkte mit den Nulldurchgängen Oszillatorfrequenz konnte zwar eine Verbesserung erreicht werden, doch das Übel nicht endgültig beseitigt werden.

Es ist jedoch möglich durch kleinere Veränderungen der Elektronik des Oszillators die Ausgangsleistung des Sondenstromes soweit zu erhöhen, daß alle drei Sonden gleichzeitig angeschlossen werden können. Dieses Verfahren beseitigt die Nullpunktsprünge der Sonden, hat dafür jedoch einen etwas höheren Verbrauch zur Folge.

Als Anschlüsse, die umgeschaltet werden müssen, verbleiben also:
1. Die Meßspule für den Empfang der zweiten Harmonischen als Meßfrequenz
2. Die Ausgangsbuchse für die niederfrequente Ausgangsspannung.

Diese Teile werden nun in folgender Reihenfolge an das Oerstedtmeter gelegt:

Komponente	Meßspule	Ausgang
H	0 - 33	1 - 32
D	34 - 66	35 - 65
Z	67 - 99	68 - 98

Die in dieser Tabelle aufgeführten Zahlen entsprechen jeweils den entsprechenden Zahlenstellungen des programmierten Zählers und damit definierten Zeitpunkten während eines Schaltzykluses. Es bedeutet, daß die Meßspule der H-Komponente von Stellung 0 bis Stellung 33, also insgesamt 34/100 sec an das Oerstedtmeter angeschlossen ist, die der D-Komponente von Stellung 34 bis Stellung 66, also 33/100 sec, sowie die der Z-Komponente von Stellung 67 - 99, also ebenfalls 33/100 sec.

Die Ausgangsbuchsen jeder Sonde werden erst eine Hunderstel Sekunde später an das Gerät angeschlossen und auch um die gleiche Zeit früher abgeschaltet, um eventuelle Einschwingvorgänge und dadurch bedingte Fehler in der Registrierung zu vermeiden.

Alle hier genannten Umschaltungen werden mit Reedrelais durchgeführt. Flipflops, die von den Impulsen der Zählschaltung angesteuert werden, halten sie in den gewünschten Schaltstellungen. Trotz der großen Schalthäufigkeit (ca. 10^5/Tag) ist bei einer Lebenserwartung der Relais von 10^8 Schaltungen erst nach einem kontinuierlichen

Betrieb von rund drei Jahren mit einem Ausfall der Schaltkontakte zu rechnen.

Beim Einschalten der Stromversorgung können die Flipflops in zufallsbedingten Stellungen stehen, d.h. zwei Meßspulen könnten gleichzeitig an das Oerstedtmeter angeschlossen sein. Dies zu verhindern dient folgende Lösung:

Die Impulse der Zählschaltung werden nicht auf die Impulseingänge der Flipflops gelegt, sondern gezielt auf die jeweiligen Stell- und Rückstelleingänge. So gelangt z.B. der Impuls der Stellung 0 des Zählers , der die H-Meßspule anschließt, nur auf den Stelleingang und kann nur ein Anziehen des Relais bewirken. Ist dies bereits der Fall, bleibt er wirkungslos. So gelingt es, die Relais spätestens nach dem Durchlauf eines Zählzyklus in die gewünschte Ordnung zu bringen. Die gleiche Zeitausdehnung gilt auch für eine Störung, die sich während der Messung einschleichen könnte.

Das an den Ausgangbuchsen anstehende Signal wird durch einen Tiefpaßfilter mit einer Bezugsperiode von 15 sec integriert und anschließend soweit verstärkt, daß eine Amplitude der Magnetfeldvariationen von ± 10 γ das zur Registrierung dienende Magnetbandgerät voll aussteuert. Vorher jedoch trennt ein Hochpaßfilter mit einer Bezugsperiode von 1800 sec die langen Variationen ab und verhindert damit ein Übersteuern des Registriergeräts.

Die Eichung geschieht genau wie bei dem älteren Gerätetyp, ist jedoch fest auf den Betrag von 5 γ eingestellt.

Abb. 9 und 10 zeigen Wiedergaben von Orginalregistrierungen der Dreikomponenten-Geräts.

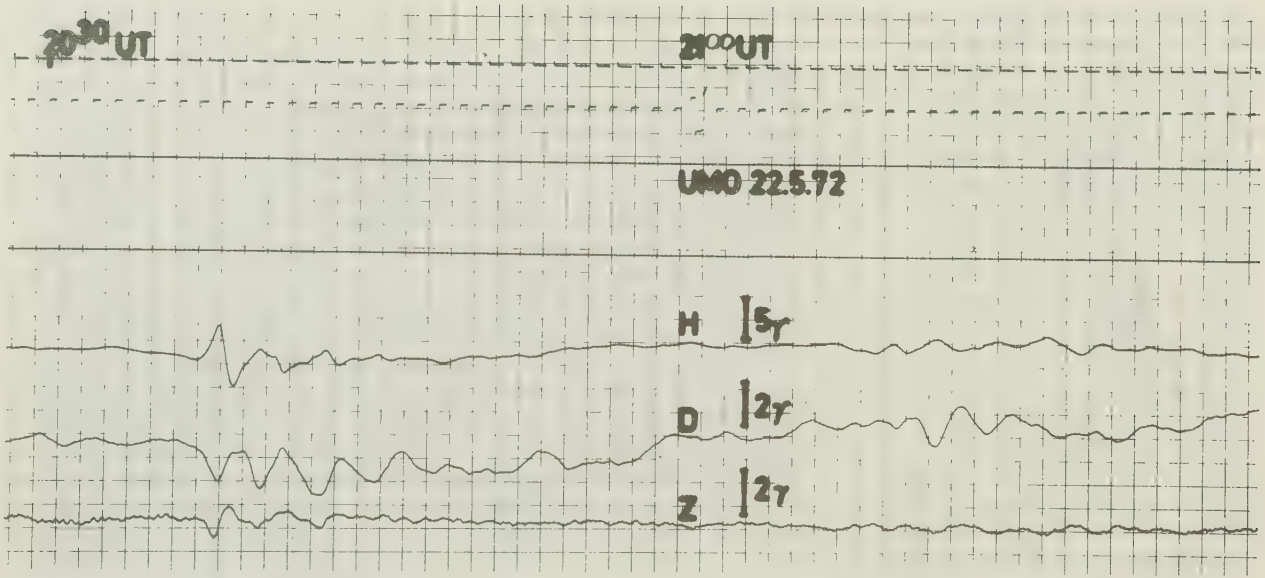

Abb. 9 Wiedergabe einer Orginalregistrierung des netzunabhängigen Magnetographen in 1/6 natürlicher Größe. Die Registrierung stammt von der Station Untermoßbach in der Nähe von Marquartstein. Das starke Rauschen der Z-Komponente ist nicht durch das Gerät bedingt, sondern rührt von vagabundierenden technischen Strömen her.

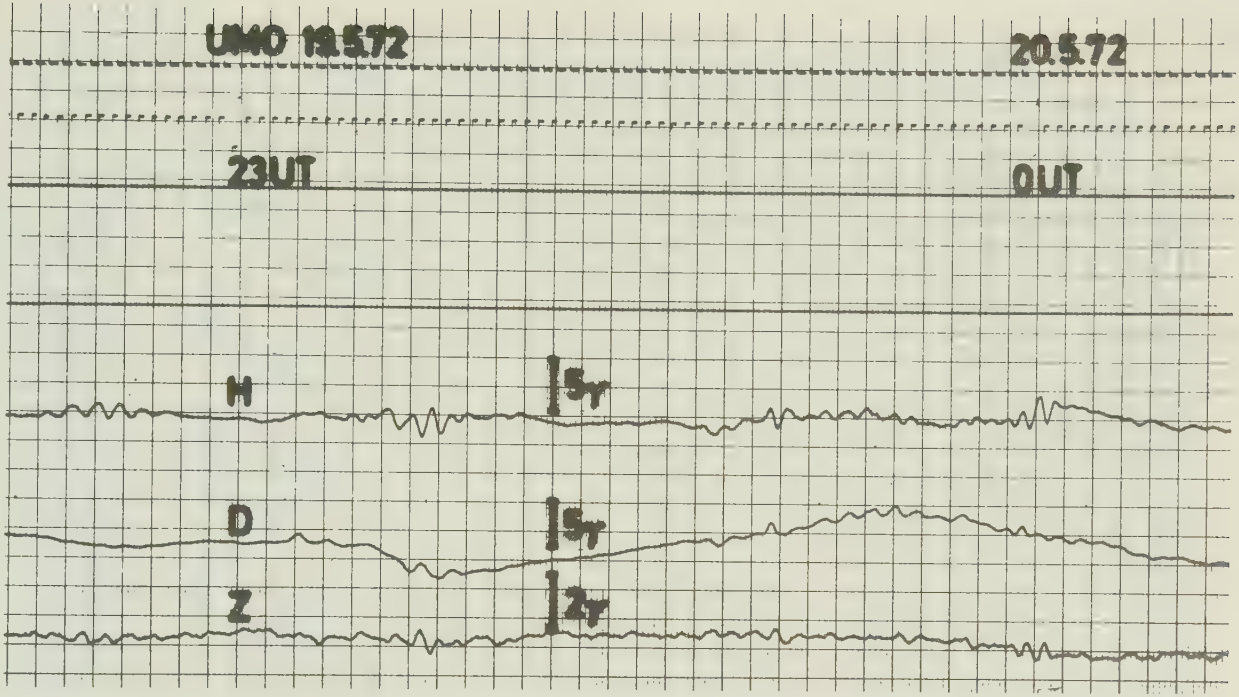

Abb. 10 Wiedergabe einer Orginalregistrierung des netzunabhängigen Magnetographen in 1/6 natürlicher Größe. Die Registrierung stammt von der Station Untermoßbach in der Nähe von Marquartstein.

Die Station wird aus einem 12V Akku gespeist. Die Leistungsaufnahme der gesamten Station, bestehend aus dem Oerstedtmeter, zwei Erdfeld-Kompensationseinschüben, dem Multiplexer, dem Verstärker- und Filterteil und dem Magnetbandspeicher ist etwa gleich 25 Watt. Das ist nicht gerade wenig, doch ermöglicht es immerhin den Betrieb der Station aus einem Akku mit 150Ah für einen Zeitraum von zwei Tagen.

Kapitel III
Aufzeichnung der Schwankungen des erdelektrischen Feldes mit einem netzunabhängigen Elektrographen.

Im letzten Kapitel wurde die Meßtechnik für die Schwankungen des Magnetfeldes beschrieben. Da zur Magnetotellurik auch die Kenntnis der gleichzeitigen Variationen des erdelektrischen Feldes gehört, sollen in diesem Kapitel die hierfür notwendigen Geräte er-läutert werden. Vorher jedoch wird auf eine für die Auswertung sehr wichtige "Nebensächlichkeit", nämlich die Zeitmarkierung eingegangen.

A Einzelheiten und Genauigkeit der Zeitmarkierung.

Werden Messungen nach der Methode der Magnetotellurik an mehreren Stationen gleichzeitig durchgeführt, ist eine genaue Kenntnis der absoluten Zeit bei allen Registrierungen erforderlich, da verschiedene Leitfähigkeiten im Untergrund nicht nur Amplitudenunterschiede hervorrufen, sondern auch Zeitunterschiede des Eintritts gleicher Effekte (Phasenverschiebungen) bewirken, die als gleichwichtige Aussage neben dem Amplitudenvergleich bestehen.

Ein Beispiel möge die geforderte Genauigkeit erläutern: Nach CAGNIARD (1954) liegen die Phasendifferenzen zwischen magnetischem und elektrischem Feld im Falle eines horizontal geschichteten Untergrunds zwischen 0° und 90°. Nimmt man als kürzeste zu registrierende Schwingung eine Periode von 10 sec an, so liegt die maximale Phasendifferenz bei 2,5 sec.

Wegen der Bedeutung der Zeitmarkierung werden bei der hier beschriebenen Apparatur zur Sicherung gegen Ausfall zwei unabhängige Zeitgeber verwendet, eine Uhr und ein Zeitzeichenempfänger.

a) Zeitmarkierung mit Hilfe der Uhr.

Verwendet wird eine Bulova Accutron Schaltuhr TE 11 - 16. Ihre Antriebsenergie bezieht sie aus einer eingebauten Knopfzelle, die bei dem geringen Stromverbrauch über ein Jahr reicht. Als Gangregulator dient eine Stimmgabel mit 360 Hz. Die hohe, von äußeren Einflüssen relativ unabhängige Konstanz dieser Schwingungen gewährleistet den Gleichlauf der Uhr. Die Abweichungen liegen meist unter ± 1,5 sec/Tag. Bei regelmäßigem Vergleich gegen Normalzeit kann der lineare Gang eliminiert werden, sodaß die tatsächliche Unsicherheit kleiner als 1 sec/Tag ist.

Für den Geländeeinsatz eignen sich diese Uhren besonders gut, da sie Beschleunigungen bis zu 1000 g ohne Schaden überstehen und in dem weiten Temperaturintervall von -10° bis $+60^{\circ}$C arbeiten.

Diese Uhren sind mit folgenden Schaltkontakten versehen:
einem Minutenkontakt; jeweils zur vollen Minute ± 0,3 sec
einem Stundenkontakt; jeweils zur vollen Stunde ± 0,3 min
einem Eichkontakt; alle vier Stunden, beginnend um 3^{30} Uhr.

Mit Hilfe dieser Kontakte werden folgende Zeitmarken erzeugt und auf dem Magnetband auf einer eigenen, für die Registrierung sonst nicht benutzten Spur aufgezeichnet:
1. Zu Beginn jeder Minute ein Rechteckimpuls von 0,8 Volt und 20 sec Dauer;
2. Zu Beginn jeder Stunde ein Rechteckimpuls von 0,4 Volt und 50 sec Dauer. Während der Dauer der Minutenmarke überlagern sich beide Spannungen und erzeugen einen Ausschlag von 1,2 Volt.

b) Zeitmarke über Zeitzeichensender.

Für eine weitere Zeitmarkierung, die eine 1000 mal höhere Genauigkeit besitzt, wird das Zeitzeichen des schweizerischen Senders HBG genutzt, der kontinuierlich auf 75 kHz ausstrahlt.

Zur Aufnahme dieses Senders dient ein tragbarer Empfänger TR 75 A, der eine im Griff eingebaute Ferritantenne besitzt. Die Stromversorgung ist entweder durch eingebaute Batterien möglich oder in unserem Falle bei kontinuierlichem Betrieb durch Anschluß an den Akku der Meßstation. Die eingebaute Antenne ist leider im Einsatz nicht zu verwenden, da der Zeitzeichenempfänger innerhalb einer gemeinsamen Schutzhütte unmittelbar neben den Meßgeräten aufgestellt werden muß. Einmal ist hier direkt am Boden die Empfangsfeldstärke sehr gering; zum anderen erzeugen die in den Geräten eingebauten Gleichspannungswandler ein breites Störspektrum, das den Empfang in dem oben genannten Wellenbereich unmöglich macht. Der Empfänger wird deshalb zur Abschirmung dieser Störungen und zugleich zum Schutz gegen Transportschäden in einen allseitig geschlossenen Aluminiumkasten eingebaut.

Als Antenne wird ein ca. 50 m langer Draht in der Umgebung der Station in den Bäumen ausgespannt und die aufgenommene Energie über einen Antennentransformator und ein Koaxialkabel als Schutz gegen Störfelder zum Empfänger geleitet. Mit dieser Anlage war an den Registrierorten im Gebiet des Rheingrabens, der Vogesen und im süddeutschen Molassebecken meist ein störungsfreier Empfang möglich, da die Antenne mit genügender Sorgfalt aufgebaut wurde.

Am Ausgang dieses Empfängers stehen folgende Kennungen mit einer Unsicherheit von + 1 msec an:
1. Zu Beginn jeder Sekunde ein Impuls von 1/10 sec Dauer
2. Zu Beginn jeder Minute ein Doppelimpuls gleicher Amplitude
3. Zu Beginn jeder Stunde ein Dreifachimpuls.

Die Amplitude dieser Zeitmarken (jeweils 8Volt) werden auf einen geeigneten Wert herabgesetzt und auf einer eigenen Spur des Magnetbandes kontinuierlich registriert. Ein Tiefpaßfilter beseitigt kurze Störungsspitzen oder Schaltstöße. Er bewirkt eine für unsere Zwecke aber bedeutungslose Zeitverschiebung von 1/20 sec.

B Elektroden.

Mit den Elektroden werden Potentialdifferenzen im Boden an zwei in einer bestimmten Entfernung voneinander liegenden Punkten abgegriffen. Da es sich bei den Spannungen der Erdströme um Wechselspannungen mit Schwingungsdauern bis zu einigen Stunden und Amplituden von meist weniger als 0,5 mV/km handelt, muß besonderer Wert darauf gelegt werden, die unvermeidlichen Kontaktspannungen mit dem Boden genügend klein und vor allen Dingen zeitlich konstant zu halten. Hierzu wurden Versuche mit verschiedenen Arten von Elektroden (Graphit, Blei) angestellt (siehe z.B. SCHUCH 1958, Dipl.-Arbeit des Verf.), die deutlich zeigten, daß die besten Ergebnisse mit unpolarisierbaren Elektroden erreicht werden. Es wurde deshalb versucht, für diesen Elektrodentyp eine möglichst günstige Bauform zu finden.

Die Elektroden (siehe Abb. 11) sind stabförmig

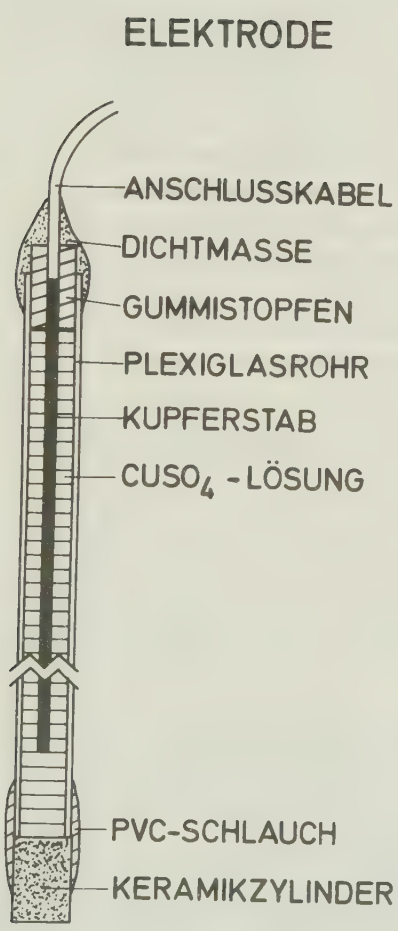

Abb. 11 Schematische Abbildung einer unpolarisierbaren Cu-$CuSO_4$-Elektrode.

und haben eine Länge von 40 cm. Das Innere des rund 1 cm dicken Plexiglasröhrchens ist mit ungesättigter Kupfersulfatlösung gefüllt. In sie taucht ein 30 cm langer Stab aus Elektrolytkupfer, der von einem durchbohrten Gummistopfen am oberen Ende gehalten wird. Dieser Gummistopfen schließt gleichzeitig die Elektrode nach oben ab. Die Konzentration der Lösung ist beliebig und kann sogar an beiden Elektroden eines Meßkreises unterschiedlich sein, da Konzentrations-Potentiale im Gerät ausgeglichen werden. Die nicht-konzentrierte Lösung verhindert, daß beim Einführen der Elektroden in den Boden und der damit verbundenen Abkühlung Kupfersulfatkristalle ausfallen. Diese können nämlich als isolierende Scheiben den ganzen Durchmesser der Elektrode ausfüllen und so den Meßkreis unterbrechen. Das untere Ende der Elektrode bildet die Kontaktstelle mit dem Boden. Diese bildet ein poröser Aluminium-Oxid-Stopfen, der von einem Plastikschlauch gehalten wird. Die Kapillaren im Inneren dieses Keramikzylinders haben einen Durchmesser von weniger als 1,5 μ. So wird der Stopfen zwar durch eindringendes Kupfersulfat elektrisch leitend, ein Auslaufen des Elektrolyten ist jedoch nicht möglich, es sei denn, es liegen besonders ungünstige Verhältnisse wie extrem trockener Sand oder sehr feiner Lehm vor.

Der Innenwiderstand dieser Elektroden ist ungefähr 1 kΩ, der Übergangswiderstand oder Kontaktwiderstand zum Untergrund hängt von der Durchfeuchtung des Bodens und der im Einzelfall tatsächlich wirksamen Aufsatzfläche ab. Er liegt zwischen 0,5 und 30 kΩ und ist damit klein gegenüber dem Eingangswiderstand des Meßgerätes.

Die Elektroden zeigen nur geringes Eigenpotential unter 5 mV, das bereits wenige Stunden nach dem Eingraben praktisch konstant bleibt. Die Veränderungen über 24 Stunden sind kleiner als ein Millivolt. Sie verlaufen sehr langsam und liegen deshalb außerhalb des hier interessierenden Frequenzbereiches.

Als Verbindungskabel zum Meßgerät dient einadrige Kupferlitze mit besonders kräftiger Isolierung, die mittels Kupplungen an die Elektroden angeschlossen wird. Zum Schutz gegen Regen und Schnee werden Plastikbeutel über die Stecker gestülpt. Diese Beutel bleiben unten offen, damit sich beim Temperaturwechsel kein Kondenswasser in ihnen bilden kann.

Die Vorteile dieser Elektroden sind: sie können ungefüllt transportiert und leicht in den Boden eingesetzt werden. Ein Stahlspieß mit einem um 2 mm größeren Durchmesser als dem der Elektroden wird entsprechend der Elektrodenlänge in den Boden getrieben und sogleich wieder herausgezogen. In das verbleibende Loch steckt man die Elektrode (Zeitaufwand dafür nur 2 - 3 Minuten).

C Der Filter- und Verstärkerteil des Elektrographen.

Geräte, die die zeitlichen Schwankungen des erdelektrischen Feldes auf Papierfilm registrieren, werden seit mehreren Jahren am IfAG eingesetzt. Dabei zeigte sich, das die anfangs verwendeten Geräte unhandlich groß und deswegen nur schwer zu transportieren waren. Des weiteren ist es umständlich und zeitraubend, die auf großen Mengen von Papierfilm vorliegenden Meßwerte für die Auswertung zu digitalisieren.

Um ein Minimum an notwendiger Zeitauflösung zu

erreichen, liefen die Papierfilme mit einer Geschwindigkeit von 12 mm/min; dies entspricht bei einem kleinsten unterscheidbaren Abstand von 0,5 mm einer Zeitauflösung von 5 sec. Bei kurzen Schwingungsdauern ist das zu wenig. Wollte man die Zeitauflösung um den Faktor 5 auf den Betrag von einer Sekunde steigern, der von der Zeitmarkierung der Uhr her sinnvoll ist, so hätte dies einen im gleichen Maß gesteigerten Filmverbrauch zur Folge gehabt. Abgesehen von dem dafür notwendigen finanziellen Mehraufwand, wäre auch die mögliche Registrierzeit zwischen zwei Stationsbetreuungen auf 4 Stunden gesunken.

Deswegen wurde bei dem Neubau der Elektrographen Magnetband als Datenträger vorgesehen. Hierfür geeignete Registriergeräte konnten Dank der Förderung der Deutschen Forschungsgemeinschaft angeschaft werden. Wegen der bei Magnetbändern möglichen sehr viel größeren Informationsdichte ergibt sich für unseren Anwendungsfall eine Zeitauflösung von 1/20 Sekunde bei einer maximal möglichen Registrierzeit von 12 Tagen. Erst dadurch wurde der Einsatz der genauen Zeitzeichenempfänger sinnvoll.

Der folgende Abschnitt soll die übrigen für die Konstruktion des Elektrographen bestimmenden Forderungen anführen und begründen.

1. Das Gerät muß aus Batterien zu betreiben, die Leistungsaufnahme also möglichst gering sein. Der Grund hierfür ist, daß nur Orte eine störungsfreie Registrierung ermöglichen, die von technischen Einrichtungen möglichst abgelegen sind.
2. Der Elektrograph muß tragbar, robust und den im Freien auftretenden klimatischen Bedingungen gewachsen sein.

3. Das Gerät muß einen hohen Eingangswiderstand besitzen. Nur so kann sichergestellt werden, daß das Gerät dem Boden wenig Strom entzieht und die natürlichen Felder unverfälscht bleiben.
4. Die Empfindlichkeit sollte so hoch wie möglich sein. Dies erlaubt, auch in Gebieten mit sehr geringer Leitfähigkeit einwandfreie Messungen durchzuführen. Gleichzeitig können so die Längen der Meßstrecken klein gehalten werden, da die Meßspannung an einem Ort der Entfernung der Elektroden voneinander proportional ist. Dies erleichtert die Aufstellung und die Auswahl der Meßorte.

5. Der Frequenzbereich der Registrierungen muß eingeengt werden, um Störungen zu unterdrücken; Störungen mit hoher Frequenz entstammen in erster Linie Einstreuungen der technischen Netze mit 16 2/3 Hz und 50 Hz. Bei langen Perioden sind es in erster Linie Schwankungen des Elektrodenpotentials - verursacht durch Veränderungen des Feuchtigkeitsgehalts des Bodens oder durch chemische Einflüsses - die ein Ausblenden der längeren Perioden bedingen.

Welcher Kompromiß ließ sich nun bei der technischen Ausführung erreichen? Eine Beschreibung des Filter- und Verstärkerteils und anschließend des Magnetbandgeräts soll dies aufzeigen.

a) Abmessungen des Verstärkerteils und Energieversorgung.

Das Gerät ist aus drei Einschüben aufgebaut, die in einem gemeinsamen Gehäuse vor Staub und Feuchtigkeit geschützt untergebracht sind. Zur Isolierung gegen Temperaturschwankungen sind die Innenflächen mit Styropor ausgekleidet. Die Abmessungen des Gehäuses sind 45 x 30 x 26 cm. Zwei der Einschübe

tragen je eine Komponente des erdelektrischen Feldes, der dritte liefert die notwendigen Betriebsspannungen und trägt die Zusatzelektronik zur Zeitmarkierung und zur automatischen Eichung. Der Aufbau in drei Einschüben brachte Vorteile für eventuelle Reparaturen und ermöglichte weiterhin eine konsequenzte räumliche Trennung der empfindlichen Meßkreise von den Versorgungsspannungen. Damit ließ sich eine Störungsquelle ausmerzen, die sich bei früheren Geräten bei großer Feuchtigkeit bemerkbar machte.

Die Versorgungsspannung wird einem 12 V Akku entnommen, die Leistungsaufnahme des Verstärkerteils ist 1,2 Watt. Zur Kontrolle des Ladezustands dient ein Spannungsmesser. Um zu verhindern, daß zwei Elektroden durch eine gemeinsame Masseleitung gekoppelt sind, ist es notwendig, die Betriebsspannungen für die Bauteile der beiden Komponenten des erdelektrischen Feldes galvanisch getrennt zu erzeugen. Deswegen liefert ein Gleichspannungswandler getrennt für jeden Kanal die notwendigen Spannungen:

+ 12 V zum Betrieb der Knickverstärker am Eingang der Meßkreise
± 15 V zum Betrieb der Operationsverstärker
+ 9 V zum Betrieb des Zeitzeichenempfängers.

Die beiden Gleichspannungstransformatoren und die Eichung können direkt aus dem Akku gespeist werden. Das gleiche gilt für die von der Uhr erzeugten Zeitzeichen.

b) Schaltung der Meßkreise

In der Beschreibung der Meßkreise genügt es, sich auf eine der beiden Komponenten zu beschränken,

da beide Kreise identisch aufgebaut sind. Siehe hierzu Abbildung 12, das Blockschaltbild des Elektrographen.

Die von den Elektroden gelieferte Meßspannung gelangt an die Eingangsbuchsen des Geräts. Hier wird mit Hilfe einer Gleichspannungs-Kompensation der konstante Anteil, der durch Eigenpotentiale im Boden oder durch Kontaktspannungen der Elektroden gebildet wird, unwirksam gemacht. Diese Einrichtung kann im Bereich von ± 70 mV stufenlos eingestellt werden und bezieht ihre Energie aus einer 1,5 V Monozelle, die in den Kompensationskreis eingelötet ist. Das Einlöten erwies sich als notwendig, da beim Einsetzen von Batteriehaltern stets störende Kontaktspannungen an den Berührungsstellen beobachtet wurden.

Als nächstes findet sich im Eingangskreis die Eichvorrichtung. Mit ihrer Hilfe wird dem Signal eine Eichspannung bekannter Größe überlagert. Die Energiequelle hierfür ist eine weitere Monozelle. Mit Hilfe eines Milliamperemeters kann die Eichspannung stufenlos zwischen 30 µV und 3 mV eingestellt werden. Um die Genauigkeit der Eichspannung zu erhöhen, werden normalerweise nur bestimmte Festpunkte benutzt, an denen der Fehler des Meßgeräts und die Abweichung des Eichwiderstands (1Ω ± 1%) vorher im Labor genau ausgemessen wurde. Durch Vergleich der Amplituden des sich ergebenden Eichausschlags mit den natürlichen Variationen des Feldes gelingt es, Betrag und Richtung des Stromflusses zu ermitteln. Da in allen Geräten die Eichbatterie in derselben Polung eingebaut ist, genügt zur Festlegung der Richtung einfach ein Vergleich der Richtung des Eichausschlags mit der Richtung

ELEKTROGRAPH

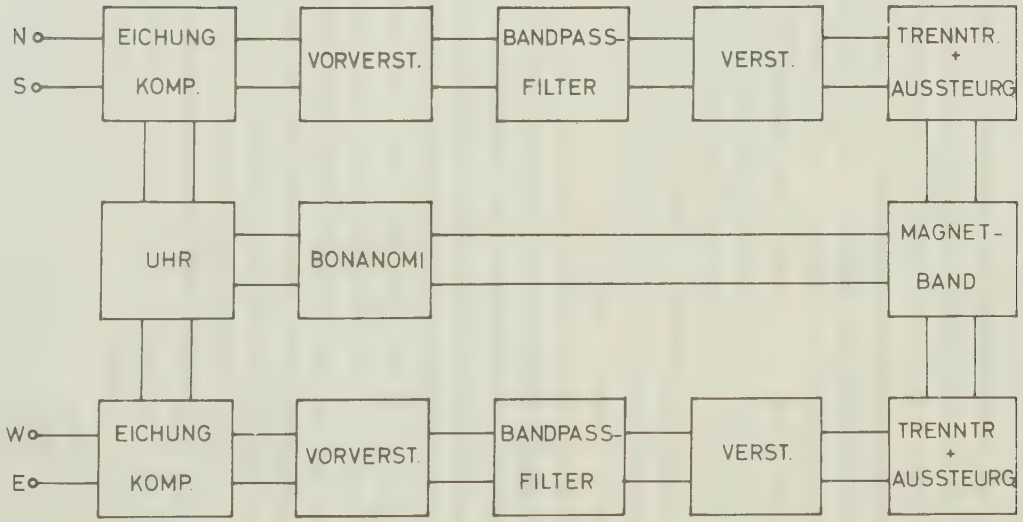

Abb. 12 Blockschaltbild des Elektrographen zur Registrierung der zeitlichen Schwankungen des erdelektrischen Feldes.

der Bewegung des Meßsignals. Es gilt hierbei:

Bei einer Amplitude in Richtung des Eichausschlags:
N- bzw. E-Elektrode besitzt negatives Potential gegenüber S- bzw. W-Elektrode;
bei einer Amplitude entgegen der Richtung des Eichausschlages:
N- bzw. E-Elektrode besitzt positives Potential gegenüber der S- bzw. W-Elektrode!
Aus dieser Kenntnis und aus dem Verhältnis der Amplituden der beiden Komponenten ist es möglich, die Stromflußrichtung im Boden über alle vier Quadranten eindeutig zu bestimmen.

Das Meßsignal gelangt, nachdem es Kompensation und Eichteil durchlaufen hat, an den Eingang des ersten Verstärkers. Da die Amplituden des Meßsignals in Gebieten mit guter Leitfähigkeit sehr klein sein können (unter 100 μV/50 m), und Perioden von mehreren Stunden beobachtet werden sollen, muß ein Verstärker mit sehr kleiner Nullpunktdrift und geringem Rauschen ausgewählt werden. Gleichzeitig muß der Verstärker einen großen Aussteuerungsbereich besitzen (= Dynamik), da durch langsame Veränderungen der chemischen Potentiale im Boden, trotz Kompensation, Gleichspannungen dem Meßsignal überlagert sein können, die die 10 bis 100fache Amplitude des Meßsignals erreichen.

Durch ein Hochpaßfilter könnten diese langsamen Veränderungen bereits an dieser Stelle ausgesiebt werden. Das geschieht aber nicht! Der Grund ist die Unvollkommenheit der Verstärker. Ein eingeprägter Reststrom, den die Eingangsstufe des Verstärkers erzeugt, muß abfließen können. Bei einer direkten galvanischen Kopplung der Elektroden mit dem Verstärker kann er dies über den Meßkreis mit einem

relativ kleinen Widerstand zwischen 0,5 und 50 kΩ (= Kontaktwiderstand der Elektroden). Legt man ein Hochpaßfilter in den Kreis, so ist der oben beschriebene Weg durch den notwendigen Kondensator blockiert. Er kann nur noch über den zum Eingang parallel liegenden ohmschen Widerstand des Filters abfließen. Dieser Widerstand muß sehr groß sein, um den Eingangswiderstand nicht unnötig zu verkleinern und um die gewünschte Zeitkonstante (5000 sec) zu erreichen. Nimmt man an der Wert des Widerstands beträgt $10^7 \Omega$, So ist die durch den Reststrom verursachte Spannung mit Filter 10^2 bis 10^5 mal grösser als bei direkter Kopplung.

Da sich wie eben beschrieben, die Filterung vor dem Verstärker nicht durchführen läßt, mußte ein Verstärker mit großem Aussteuerungsbereich gewählt werden. In unseren Geräten wird ein Verstärker der Firma Knick, Berlin, Typ C 6 eingesetzt. Die Rauschspannung am Eingang des Verstärkers ist etwa gleich 2 μV, Die Nullpunktdrift pro Monat kleiner als 20 μV. Der Verstärker besitzt eine eingeprägte Stromverstärkung von 0,1 mA/mV. Dies bedeutet, eine Eingangsspannung von 1 mV bewirkt einen vom Ausgangswiderstand unabhängigen Strom von 0,1 mA. Über die Größe dieses Widerstands läßt sich so die Spannungsverstärkung einstellen. Die maximale Ausgangsspannung darf dabei nicht größer als 10 V sein.

Im Elektrographen werden die Verstärker mit einem Ausgangswiderstand von 2 KΩ eingesetzt. Damit ergibt sich eine 200fache Spannungsverstärkung und bezogen auf den Eingang ein Aussteuerbereich von ± 50 mV. Das am Ausgang anstehende Signal wird einem Bandpaßfilter zugeführt, der das für die Registrierung gewünschte Frequenzband heraussiebt. Da die

an den Ausgangsbuchsen des Verstärker anstehende Spannung um den Verstärkungsfaktor größer geworden ist, bereitet die Filterung hier wesentlich weniger Schwierigkeiten.

Zuerst muß die hohe Gleichspannungs-Komponente abgetrennt werden. Da Elektrolytkondensatoren für diesen Zweck zuviele Nachteile haben, werden Kunststoff-Kondensatoren eingesetzt. Der Isolationswiderstand dieser Bauart erreicht Werte von 10^{11} bis $10^{12}\,\Omega$. Der Leckstrom kann also vernachlässigt werden. Nachteilig ist, daß die größte Ausführung nur eine Kapazität von 100 μF besitzt.

Für das Hochpaßfilter, das eine Bezugsperiode von 5000 sec erreichen soll, werden zwei solcher Kondensatoren parallel geschaltet. Dies ergibt eine wirksame Kapazität von 200 μF. Für den Widerstand R errechnet sich dann nach der Formel

$$R = \frac{T}{2\pi C}$$

T = Bezugsperiode in Sekunden
C = Kapazität in Farad
R = Widerstand in Ω
ein Widerstand von $4.10^6\,\Omega$.

Zu kurzen Perioden hin werden die Amplituden durch ein zweistufiges Tiefpaßfilter beschnitten, dessen Bezugsperiode von 0,3 sec so gewählt wurde, daß genügend Abstand zu den am stärksten störenden Frequenzen des technischen Wechselstroms besteht. Um die Amplituden der 16 2/3 Hz -Frequenz der Bundesbahn noch weiter abzusenken, wurde hierfür ein abgestimmter Saugkreis eingebaut.

Das nach dem Bandpaßfilter verbliebene Meßsignal muß nun weiter verstärkt werden, um das als Registriergerät dienende Magnetbandgerät aussteuern zu können.

Zu beachten ist dabei, daß der ohmsche Widerstand des Hochpaßfilters durch den Eingangswiderstand des nachfolgenden Verstärkers nicht merklich belastet wird und der Reststrom des Verstärkers klein ist. Ein Reststrom von 1 μA würde bereits eine Fehlspannung von 4 V ergeben!

Aus diesen Gründen werden Operationsverstärker eingesetzt. Der Eingangswiderstand des benutzten Typs beträgt $10^{11}\,\Omega$, der Leckstrom ist kleiner 10^{-10} A und die Leerlaufverstärkung größer 10^{5}fach. Leider lassen sich diese Verstärker nicht im Eingangskreis einsetzen, da sie dort den Anforderungen in Bezug auf Rauschen und Nullpunktdrift nicht genügen. Das Meßsignal gelangt an den nicht invertierenden Eingang des Verstärkers. Der invertierende ist zur Regelung der Verstärkung über eine einstellbare Gegenkopplung mit dem Ausgang verbunden. Mit Hilfe eines Grob- und Feinreglers läßt sich so die Verstärkung zwischen 1 und 200fach einstellen. Ein Kondensator im Gegenkopplungskreis ermöglicht, die Verstärkung auf den Frequenzbereich des Meßsignals zu beschränken.

Der Aufzeichnungsbereich der Magnetbandgeräte ist $\pm$ 1 V. Berechnet man die Gesamtverstärkung des Elektrographen, so findet man, daß sich diese zwischen 200fach und 40 000fach einstellen läßt. Daraus ergibt sich für die Vollaussteuerung eine notwendige Amplitude im Durchlaßbereich der Filter zwischen 5 mV und 25 μV. Unabhängig von der Empfindlichkeit dürfen dem Signal noch Gleichspannungen bis zu$\pm$50 mV überlagert sein. Der Ausgang der Verstärker ist mit einem Lastwiderstand von 2 kΩ abgeschlossen. Im Ausgangskreis findet sich auch ein Anzeigeinstrument zur Aussteuerungskontrolle der Bandgeräte.

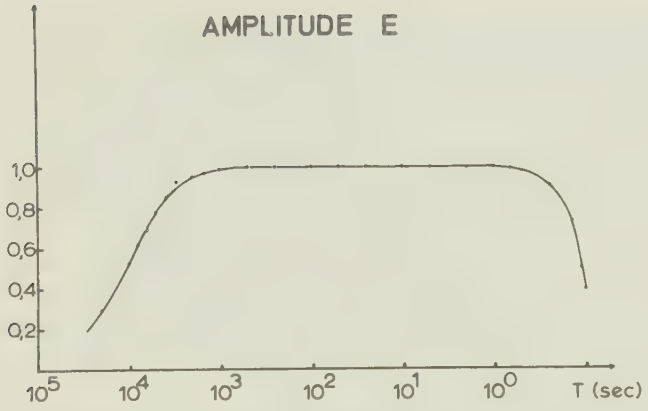

Abb. 13 Amplitudendurchlaßkurve des Elektrographen.

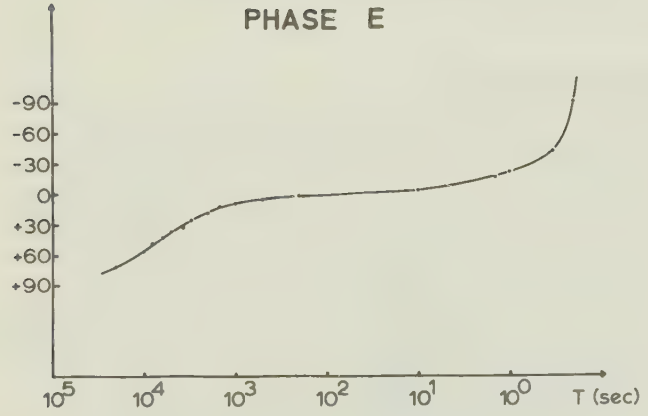

Abb. 14 Phasendurchlaßkurve des Elektrographen

Bis zum Ausgang der Operationsverstärker sind die beiden Registrierkreise des Elektrographen vollständig getrennt. Da beim Magnetbandgerät die Masseleitungen alle auf gleichem Potential liegen, erlaubt erst der Einsatz von Gleichstrom-Trenntransformatoren beide Kanäle an den Eingang des Magnetbandspeichers anzuschließen, ohne zwei Elektroden kurzzuschließen. Der Aufbau des gesamten Geräts ließe sich wesentlich vereinfachen, wenn diese Trennung bereits im Eingang der Meßkreise möglich wäre. Das hohe Eigenrauschen von 1 mV der Trenntransformatoren verhindert jedoch einen Einsatz an dieser Stelle.

Die Ausgangsspannung der beiden Komponenten werden nun gemeinsam mit den Informationen für die Zeitmarkierung an den Eingangsstecker des Magnetbandgerätes gelegt und dort aufgezeichnet. Die Amplituden-Durchlaßkurve und die Phasendurchlaßkurve der Meßkanäle ist in Abb. 13 und Abb.14 dargestellt.
Für die Auswertung wird der Bereich zwischen 1 sec und 5000 sec benutzt.

D Das Magnetbandgerät.

Die Aufzeichnung der zeitlichen Schwankungen des erdelektrischen Feldes und des erdmagnetischen Feldes erfolgt bei den hier beschriebenen Elektrographen und Magnetographen auf Magnetband. Da die für die Aufzeichnung notwendigen Registriergeräte netzunabhängig sein müssen und gleichzeitig lange Registrierdauern ermöglichen sollen, ist das Angebot beschränkt.

Am IfAG wird der Magnetbandspeicher 5100 der amerikanischen Firma Precision Instruments eingesetzt. Er besitzt ein luft- und wasserdichtes Gehäuse mit

den Abmessungen 50 x 40 x 25 cm und wiegt 14 kg. Zur Energieversorgung genügt ein 12 V Akku, die Leistungsaufnahme ist 7 Watt.

Das Gerät zeichnet sieben getrennte Spuren gleichzeitig auf ein 1/2 Zoll breites Magnetband auf. Es können Spulen bis zu einem Durchmesser von 14 Zoll eingesetzt werden. Bei einer Bandgeschwindigkeit von 15/160 ips (=2,38 mm/sec) ermöglicht dies ununterbrochene Registrierzeiten bis zu maximal 12 Tagen.

Die Aufzeichnung erfolgt frequenzmoduliert mit einer Mittenfrequenz von 84,4 Hz und einer maximalen Frequenzänderung von ± 40% bei Vollaussteuerung. Dies entspricht der IRIG-Norm "Low band" und kann auf normalen Instrumentations-Bandgeräten mit höherer Geschwindigkeit zur Zeitraffung abgespielt werden.

Das Frequenzintervall der Aufzeichnung reicht von 0 bis 17 Hz (-3 dB) und erreicht eine Dynamik von 37 dB.

Werden die Bandgeräte zusammen mit den schon beschriebenen Geräten eingesetzt, so erfolgt die Aufzeichnung der einzelnen Informationen in der folgenden, festgelegten Reihenfolge:

Kanal-Nr.	Information
1	Zeitzeichenempfänger
2	Zeitmarke der Uhr
3	E-Feld NS-Komponente
4	E-Feld EW-Komponente
5	Magnetfeld (H)
6	Magnetfeld (D)
7	Magnetfeld (Z)

Abb. 15 und 16 zeigen Orginalaufnahmen von Registrierungen des Elektrographen und des Magnetographen.

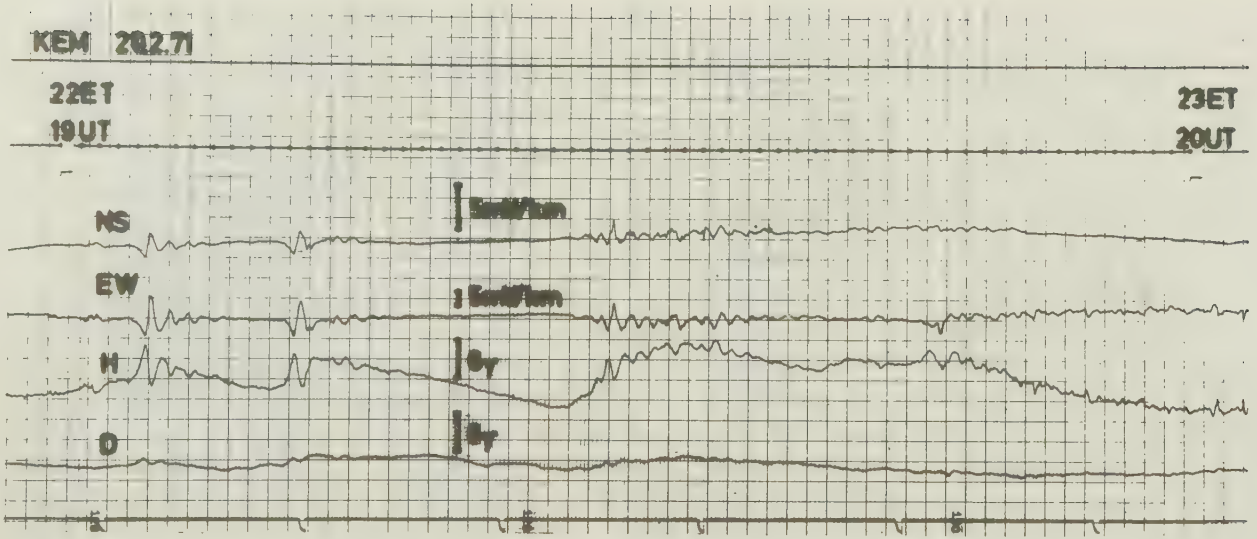

Abb. 15 Orginalaufnahme der Abspielung auf Papierschreiber einer Magnetbandregistrierung mittels des Elektrographen und des Magnetographen an der Station KEMBOLCHA in Äthiopien (ca. 1/6 nat. Größe).

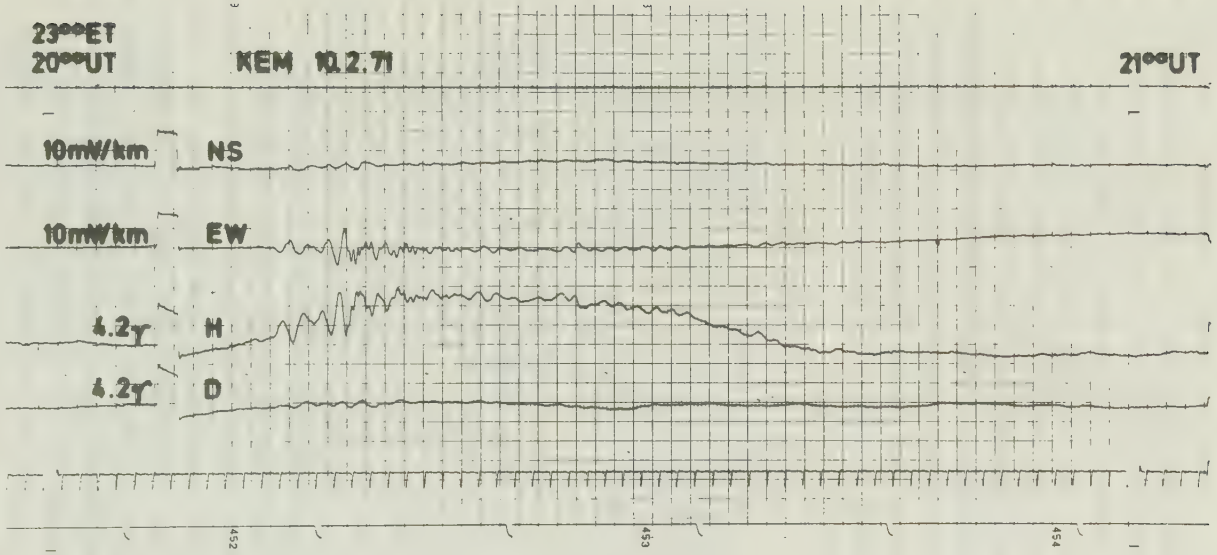

Abb. 16 Orginalaufnahme einer Abspielung einer Magnetbandregistrierung auf Papierschreiber mittels des Elektrographen und des Magnetographen an der Station KEMBOLCHA in Äthiopien (ca. 1/6 nat. Größe).

Kapitel IV
Wiedergabe der Registrierungen und Digitalisierung.

Die weitere Verarbeitung des Registriermaterials erfordert wegen der Vielzahl der Daten und wegen der notwendigen und aufwendigen Rechenoperationen den Einsatz von digitalen Rechenanlagen. Dies führt zwangsläufig dazu, daß, solange die Registrierung noch nicht direkt digital erfolgt, die aufgezeichneten Kurvenzüge in digitale Werte umgesetzt werden müssen. Dies geschieht je nach Datenträger auf unterschiedliche Weise.

A Digitalisierung der Magnetband-Registrierungen.

In diesem Fall liegen die Daten als frequenzmodulierte Aufzeichnungen auf Siebenspur-Magnetband vor. Eine Erleichterung bedeutet dabei, daß die einzelnen Komponenten getrennt voneinander abgespielt werden können. Die Auswertung geschieht dabei auf folgende Weise:
Die Magnetbänder werden auf einer Ampex Abspielanlage FR 1900 mit einer Geschwindigkeit von 60 ips (= 152 cm/sec), also mit 640facher Zeitraffung gegenüber der Aufnahme abgespielt. Eine Spule mit 14 Zoll Durchmesser, die einer tatsächlichen Registrierzeit von 12 Tagen entspricht, läßt sich so in ca. 25 min abspielen. Als Aufzeichnungsgerät dient ein Tintenschreiber Oszillomink der Firma Siemens, dessen Frequenzumfang von Ø bis 1000 Hz (-3 dB) reicht. Hierbei werden sämtliche Spuren gleichzeitig auf das Papier übertragen. Der Papiervorschub des Schreibers wird dabei so gewählt, daß bezogen auf die Registrierzeit, sich nur eine Papiergeschwindigkeit von 6 cm/sec ergibt. Als Zeitmarken dienen hierbei die Zeitzeichen der Uhr, die auch bei dieser Geschwindigkeit auf dem Papier deutlich zu erkennen sind. Natürlich läßt sich mit

einer derart langsamen Papiergeschwindigkeit der volle Frequenzinhalt der Signale nicht erfassen, doch liegt der Sinn dieser Abspielungen darin, technisch ungestörte, aktive Zeiträume zu lokalisieren. Von diesen Zeiträumen, die nur 10 bis 20% der gesamten Registrierzeit ausmachen, werden dann weitere Abspielungen hergestellt, die je nach Frequenzinhalt Papiervorschübe bis zu 90 cm/h aufweisen. An Hand dieser schnellen Abspielungen können dann die genauen Anfangs- und Endpunkte der zu digitalisierenden Intervalle festgelegt werden.

Bei der nun folgenden Digitalisierung kann die hohe Geschwindigkeit des Bandgerätes von 60 ips nicht mehr beibehalten werden, da der mechanische Lochstreifenstanzer nur maximal 20 Ablesungen pro Sekunde verarbeiten kann. Die Bandgeschwindigkeit wird deshalb auf zwanzigfache Zeitraffung reduziert. Um die volle Genauigkeit der Zeitmarkierung auch nützen zu können und um Gleichlauffehler des Bandgerätes bei der Aufnahme zu berücksichtigen, wird als Digitalisierbefehl die Sekundenmarke des Zeitzeichensenders benutzt, die während der Registrierung aufgespielt wurde.

Es gilt nun noch, den Digitalisiervorgang zum richtigen Zeitpunkt zu starten und zu beenden. Da bei der zwanzigfachen Abspielgeschwindigkeit ein Festlegen des Anfangs- und Endpunktes der Digitalisierung manuell nicht mehr möglich ist, mußte

a) ein Gerät gebaut werden, das diese Arbeit übernimmt

b) ein für den selbstätigen Start geeigneter Punkt gefunden werden.

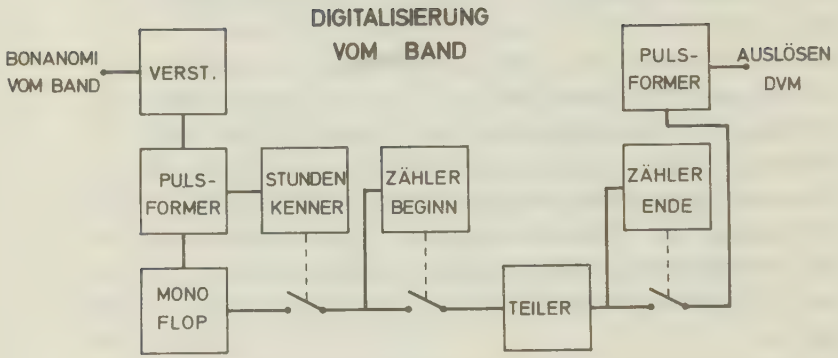

Abb. 17 Blockschaltbild des Geräts zum Auslösen der Digitalisierung.

Als Startpunkt wurde die letzte Stundenmarke vor dem zu digitalisierenden Intervall gewählt. Das Zeitzeichen hierfür ist ein Dreifachimpuls im Gegensatz zum Einfachimpuls der Sekundenmarke und dem Doppelimpuls der Minutenmarke. Trotzdem sollte der Anfangspunkt des zu digitalisierenden Intervalles beliebig festgelegt werden können, genau wie die zeitliche Ausdehnung.

Diese Forderungen wurden folgendermaßen realisiert: Das vom Band abgegriffene Zeitsignal wird im Eingang des Auslösegeräts für die Digitalisierung in ein exaktes Rechteck umgewandelt und gelangt an den Eingang eines elektronischen Zählers, der stets nach einer halben Sekunde (die Zeitangaben beziehen sich auf die bei der Aufnahme tatsächlich verstreichende Zeit) auf Null zurückgestellt wird. Treffen nun innerhalb dieser Zeit drei Impulse ein - dies geschieht bei jeder Stundenmarke -

so schließt der Zähler eine Relais-Torschaltung und löst dadurch den Start eines Vorzählers aus. Dieser wird vorher von Hand auf die bis zum Intervallbeginn verbleibende Anzahl von Sekunden gestellt. Ist diese Zahl erreicht, so schließt sich ein Kontakt und die Impulse gelangen durch durch einen Pulsformer, der die notwendige Signalamplitude erzeugt, an den Befehlseingang eines Digitalvoltmeters. Jeder Puls bewirkt eine Ablesung des gerade am Meßeingang des Voltmeters anstehenden Spannungswertes. Um beim Digitalisieren von Intervallen mit längerer Periode nicht unnötig viele Ablesungen zu erhalten, ist es durch einen Teiler möglich, eine Ablesung nur jede zweite, fünfte und zehnte Sekunde vornehmen zu lassen.

Am Ausgang des Teilers werden die Ablesebefehle mit Hilfe eines zweiten Zählers mit einstellbarer Vorwahl gezählt. Ist die eingestellte Zahl erreicht, wird die Ablesung des Digitalvoltmeters gestoppt. So ist die Intervallänge über die Anzahl der Ablesungen und deren Abstand voneinander in Sekunden festgelegt.

Das Digitalvoltmeter arbeitet nach dem Integrations-Prinzip mit einer Zeitkonstanten von 20 oder 40 msec. Da bei der Abspielung die Zeit zwanzig Mal gerafft wird, entspricht dies wirksamen Integrationszeiten von 400 bzw. 800 msec. Der dadurch bewirkte Amplituden- und Phasenfehler wird im nächsten Kapitel diskutiert.

Um ein Intervall zu digitalisieren sind folgende Handgriffe notwendig:
Man läßt das Band bis kurz vor die letzte Stundenmarke vor dem gewünschten Intervall laufen und stoppt ab. Dann wird auf dem Vorzähler die Anzahl

der bis zum Intervallbeginn ablaufenden Sekunden eingestellt. Dem zweiten Zähler gibt man die Anzahl der abzulesenden Werte ein und legt anschließend mit Hilfe des Teilers den zeitlichen Abstand zweier aufeinander folgender Ablesungen fest. Nun kann der Bandtransport gestartet werden, der Vorgang der Digitalisierung läuft dann selbsttätig ab. So ist eine Komponente abgelesen. Zum Digitalisieren der zweiten Komponente wird das Band auf den Anfangspunkt vor der letzten Stundenmarke zurückgespult, der Eingang des Digitalvoltmeters auf die nächste Spur umgeschaltet und ein neuer Durchlauf der Prozedur gestartet.

Die so erhaltenen Lochstreifen werden noch mit den erforderlichen Zusatzinformationen wie Eichfaktoren, Grundperiode usw. versehen und auf einem Blattschreiber zur Kontrolle protokolliert.

B Veränderung des Meßsignals durch die Digitalisierung.

Wie schon erwähnt, erstreckt sich die Ablesung des Digitalvoltmeters wegen der Zeitraffung beim Abspielen über eine Registrierzeit von 0,4 bzw. 0,8 sec, je nach Einstellung des Voltmeters. Diese Zeiten sind bereits mit den kürzesten, zumessenden Periodenlängen von 10 sec vergleichbar. Die Änderung der Amplituden und Phasen durch die Digitalisierung soll deshalb kurz untersucht werden.

Bei der Ablesung wird die Amplitude des Meßsignals über die Integrationszeit des Digitalvoltmeters gemittelt. Die Ablesung beginnt jeweils in dem durch das Zeitzeichen festgelegten Augenblick und ist 0,4 bzw. 0,8 sec später beendet. Der erhaltene Wert ist damit nicht gleich dem ge -

wünschten Wert Xo zum Zeitpunkt To, dem Beginn der jeweiligen Ablesung, sondern gleich dem Wert zum Zeitpunkt To + T/2, wobei T gleich der Ablesedauer des Digitalvoltmeters ist. Damit bewirkt die Digitalisierung eine frequenzabhängige Phasenänderung. Die Änderung der Phase sind in Abb. 19 dargestellt. Der eingetragene Parameter bedeutet die Integrationszeit des Digitalvoltmeters. Bei 10 sec Periodendauer ist der Phasenfehler gleich 7° bei 0,4 sec Integrationszeit, bzw. 14° bei 0,8 sec Integrationszeit. Dieser Fehler ist größer als der tragbare Fehler und muß deshalb bei der Auswertung berücksichtigt werden.

Aber auch die Amplituden des Meßsignals werden durch die Ablesung verfälscht und zwar verkleinert. Die Ablesung des Digitalvoltmeters bildet eine Kastenfunktion. Nach BLACKMAN - TUCKEY (1959) gilt für die spektrale Durchlaßfunktion einer Kastenfunktion:

$$S(f) = 2.T/2 \frac{\sin(\omega . T/2)}{(\omega . T/2)}$$

T = Länge der Kastenfunktion = Ablesedauer des Digitalvoltmeters

ω=Kreisfrequenz der abgelesenen Periode.

Graphisch aufgetragen zeigt die Kurve der spektralen Durchlaßfunktion den in Abb. 18 gezeigten Verlauf. Auch hier stellt der Parameter wieder die Ablesedauer des Digitalvoltmeters dar. Wie man sieht, ist der Fehler im ungünstigsten Fall bei einer Periode von 10 sec und einer Integrationszeit von 0,8 sec etwa gleich 1% und kann deshalb vernachlässigt werden. Bei noch

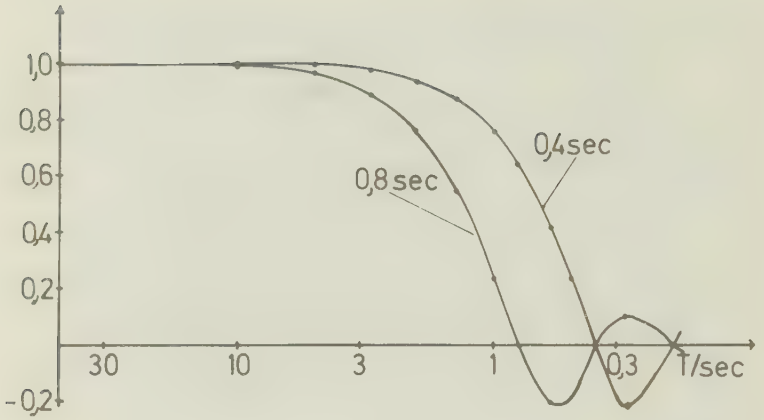

Abb. 18 Amplitudenfehler des Digitalisiervorgangs

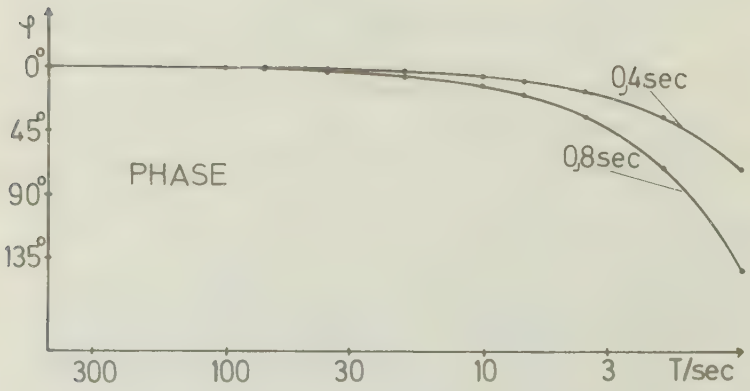

Abb. 19 Phasenfehler des Digitalisiervorgangs

kürzeren Perioden, die vom Rauschen des Bandgerätes oder von technischen Störungen stammen, tritt eine erwünschte Amplitudendämpfung auf.

C Digitalisierung der Schreiberregistrierungen.

Bei der Registrierung auf Papier oder Film werden zwei oder drei Komponentengemeinsam mit der Zeitmarkierung auf einem Streifen untergebracht. In Zeiträumen starker Aktivität des magnetischen Feldes überschneiden sich die einzelnen Spuren häufig. Der Einsatz von automatischen Kurvenfolgern ist deshalb nicht möglich, die Digitalisierung muß von Hand erfolgen.

Dies geschieht mit Hilfe eines Kurvenfolgers der englischen Firma PCD Lim., bei dem der Film fest eingespannt und das Fadenkreuz in beiden Koordinatenachsen von Hand verschoben wird. Die Stellung des Fadenkreuzes wird in beiden Achsen als analoge Ausgangs-Spannung zwischen Ø und 10 V angezeigt. Nullpunkt und Verstärkung lassen sich in weiten Grenzen verändern. Die Auflösegrenze ist in beiden Achsen durch den Abstand zweier aufeinander folgender Windungen eines linearen, drahtgewickelten Potentiometers festgelegt. Sie liegt bei 0,13 mm.

Für unsere Auswertung genügt es, äquidistante Ablesungen der Ordinate zu erhalten. Der Abstand der Ablesungen muß sich dabei unterschiedlichen Papiergeschwindigkeiten und dem Frequenzinhalt anpassen lassen. Dazu wird die Ausgangsspannung der Abszisse an den Eingang eines speziellen Digitalvoltmeters gelegt. Dieses arbeitet incremental, d.h. die Anzeige ändert sich nur zu positiven Werten hin und nur in Schritten von 10 mV. Verändert sich der am Eingang des Digitalvoltmeters

anliegende Wert um mehr als 10 mV, so springt die Anzeige am entsprechenden Punkt auf den neuen Wert. Gleichzeitig mit der Veränderung der digitalen Anzeige, erzeugt das Gerät einen Stop-Impuls, der eine weitere Bewegung des Fadenkreuzes in X-Richtung unterbindet. Da sich der Gradient der X-Spannung zwischen 0,2 und 0,001 V/cm einstellen läßt, ergibt dies praktisch beliebige Schrittweiten. An den so bestimmten Abszissenpunkten wird das Fadenkreuz auf den gewünschten Ordinatenpunkt gestellt und der Y-Wert mit Hilfe des bereits im letzten Kapitel erwähnten Digitalvoltmeter auf Knopfdruck hin abgelesen und in Lochstreifen gestanzt. Die Empfindlichkeit des Digitalvoltmeters wird dabei so gewählt, daß die Änderung eines Digits mit der Auflösung des Kurvenfolgers von 0,13 mm zusammenfällt.

D Bestimmen der Richtungen des erdelektrischen und erdmagnetischen Feldes aus den Registrierungen der unterschiedlichen Instrumente.

Bei der Auswertung von Messungen nach der Methode der Magnetotellurik müssen die Polungen der einzelnen Komponenten und damit die Richtungen des Feldvektors bestimmt werden. In unserem Falle muß diesem Punkt besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden, da am IfAG drei verschiedene Gerätetypen und drei verschiedene Aufzeichnungs-Verfahren eingesetzt werden.

Die Richtung wird bei den eingesetzten Geräten mit Hilfe der Eichvorrichtung bestimmt. Diese überlagert am Ort der Sonde (Magnetfeld) oder im Eingangskreis (E-Feld) ein zusätzliches Feld bekannter Größe und Richtung. Dieses ist zum Beispiel bei der Förstersonde in der H-Komponente nach Norden, in der D-Komponente nach Westen und in der Z-Kom-

ponente nach unten gerichtet. An Hand der auf den Registrierungen erkennbaren Eichausschläge , deren Richtung auf dem Registriermaterial und der Kenntnis der Richtung ihrer Felder kann durch Vergleich die Richtung der natürlichen Variationen in den einzelnen Komponenten und daraus die räumliche Lage des Feldvektors für jeden Zeitpunkt bestimmt werden.

Einfach wäre es, wenn beim elektrischen und beim magnetischen Feld Variationen, die in die gleiche Richtung zeigen, auch auf den Registrierungen parallel verlaufen würden. Da dieser Sachverhalt wegen der unterschiedlichen Registrierverfahren nicht der Fall ist, muß durch Umpolungen innerhalb des nachfolgenden Rechenprogramms diese Forderung erfüllt werden.

Der Vorgang der Digitalisierung unterschiedlicher Registrierverfahren kann weitere Umpolungen hervorrufen und muß deshalb in einem festen, in seinen Auswirkungen bekannten Schema erfolgen. Dieses hat folgende Form:
Von den Registrierungen auf Magnetband können mit Hilfe der am IfAG vorhandenen Digitalisieranlage aus technischen Gründen nur negative Werte abgelesen werden. Diese werden aus den ursprünglichen Werten durch Addition einer negativen Vorspannung erzeugt. Bei der Speicherung der Daten auf Lochstreifen wird das negative Vorzeichen weggelassen und dadurch eine Drehung um 180^{o} bewirkt. Diese wird dann im Rechenprogramm wieder rückgängig gemacht. Um dieses Programm einheitlich auf alle Registrierungen anwenden zu können, werden auch die Registrierungen auf Film oder Papierschreiber negativ abgelesen. Dieses läßt sich am Kurvenfolger durch ein Verschieben der Nullinie über denRegistrier-

streifen erreichen. Nach der üblichen Konvention werden die Koordinaten nach Norden und nach Osten positiv gezählt. Nun muß noch dafür gesorgt werden, daß sich bei Variationen in diese Richtungen die Zahlenwerte zu positiven Werten hin verändern. Bei der Mehrzahl der Instrumente ist dies bereits bei der Konstruktion berücksichtigt worden, für den Rest muß eine Multiplikstion mit (-1) die gewünschte Drehung herbeiführen.

Dazu die folgende Tabelle! Ihr ist zu entnehmen, ob eine Komponente umgepolt werden muß und wenn ja, welche.
Spalte 1 gibt an, welches Gerät beschrieben wird;
Spalte 2 sagt dann, in welche geomagnetische Richtung die Eichung zeigt;
Spalte 3 gibt an, welche Richtung die Eichung auf den Registrierungen innehat und
Spalte 4 schließlich legt fest, welche Komponente umgepolt werden muß.

1 Gerät	2 Richtung des Eichfeldes	3 Richtung der Eichung auf der Registrierung	4 Komponente die gedreht werden muß
Magnetographen			
Variograph der Fa. Askania	H nach N, D nach E, Z nach unten	H, D, Z nach oben	keine
Magnetograph mit Förstersonden Schreiberregistr.	H nach N, D nach W, Z nach unten	H, D, Z nach unten	H-Komponente Z-Komponente
Magnetograph mit Förstersonden Magnetbandregistr.	H nach N, D nach W, Z nach unten	H, D, Z nach "oben"	D-Komponente
Elektrographen			
Elektrographen mit Magnetbandregistr.	NS nach N, EW nach E,	NS, EW nach "oben"	keine
Elektrographen mit Filmregistrierung	NS nach S, EW nach W,	NS, EW nach unten	keine

Kapitel V

Auswertung von Messungen des erdelektrischen und erdmagnetischen Feldes an zwei Stationen im Bereich der Afarsenke in Äthiopien.

Die im bisherigen Teil der Arbeit beschriebenen Geräte wurden im Frühjahr 1971 bei Messungen des erdelektrischen und erdmagnetischen Feldes in Äthiopien eingesetzt. Ziel dieser im Rahmen eines größeren Forschungsprojektes durchgeführten Untersuchungen war es, Strukturen im oberen Erdmantel im Gebiet der Afarsenke zu erkunden. Aus den 36 über das Areal verteilten Stationen wurden zwei Meßorte ausgewählt, um die Einsatzmöglichkeiten der Geräte zu demonstrieren und um eine erste Auswertung zu erhalten.

A Lage der Stationen

Die beiden ausgewählten Stationen waren KEMBOLCHA, die Basisstation für den ersten Teil der Messungen, gelegen an der Straße von Addis Ababa nach Assab und die Station 192 , gelegen bei km 192 der von der deutschen Firma Trapp durch die südliche Afarsenke gebauten neuen Straße, einer Verbindungsstrecke zwischen der Straße Addis - Assab und der Straße Addis - Dire Dawa.

Die beiden Stationen haben folgende Koordinaten:

Name	Stat.-Nr.	nördl. Breite	östl. Länge	Höhe ü. NN
KEM	05	11° 4'	39° 43'	1800 m
192	22	10° 22'	40° 40'	750 m

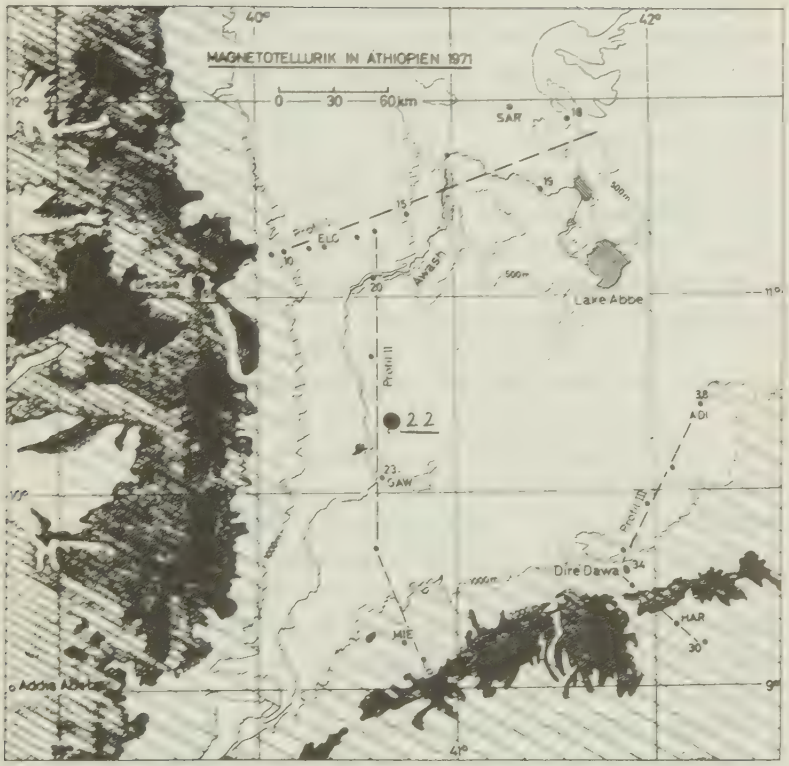

Abb. 20 Lageplan der Stationen.
Die ausgewählten Meßorte sind durch einen kräftigen Punkt hervorgehoben.

Die Station KEM (05) liegt im NS streichenden Escarpment des äthiopischen Hochplateaus, inmitten eines Kessels von ca. 5 km Durchmesser. Er ist mit Sedimenten unbekannter Mächtigkeit gefüllt. Die Geräte standen in einer abgelegenen Hütte am Verkehrs-

flughafen von Dessie. Netzanschluß war vorhanden. An dieser Station wurden die beiden horizontalen Komponenten des erdelektrischen und die beiden horizontalen Komponenten des erdmagnetischen Feldes gemessen.

Die Station 192 liegt in der südlichen Afarsenke, ca. 20 km östlich des morphologisch erkennbaren Randes des Escarpments. An dieser Station wurden nur die beiden horizontalen Komponenten des erdelektrischen Feldes gemessen.

B Lage der Stationen zum magnetischen Äquator.

Schon die geographischen Koordinaten lassen vermuten, daß die beiden Stationen sehr nahe am magnetischen Äquator (=Dip-Äquator) liegen. Dieser verläuft im Gebiet von Athiopien bei ca 9^{o} nördl. Breite. Die Registrierungen lassen den Einfluß des äquatoriellen Elektrojets deutlich erkennen. Die Amplitude der durch den Elektrojet bedingten täglichen Variationen an der Station KEM waren in der H-Komponente etwa gleich 100γ, in der D-Komponente etwa gleich 10γ. Dadurch wird eine der Voraussetzungen für die Auswertung nach CAGNIARD , die Homogenenität des anregenden Magnetfeldes verletzt. Da der Elektrojet jedoch nur am Tage existiert, sollten Nachteffekte davon nicht beeinflußt sein, ja sogar wegen der großen Entfernung von den magnetischen Polen besonders homogen sein. Aus diesem Grunde wurden für die Auswertung nur Effekte aus dem Zeitraum zwischen 20^{oo} und 6^{oo} Uhr äthiopischer Zeit ausgewählt. Dadurch kann trotz der großen Entfernung von 120 km , die zwischen der Basisstation KEM und der E-Feldstation 192 liegt, das E-Feld dieser Station unbedenklich auf das Magnetfeld der Basisstation bezogen werden.

C Auswahl der Intervalle und Trennung der Perioden durch Frequenzanalyse.

Der Weg, der vom Registriermaterial einer Station zu einer Aussage über die Leitfähigkeits-Verteilung im Untergrund führt, gliedert sich in mehrere Abschnitte. Das Verfahren, das hier angewandt wurde, ist das am Institut übliche. Es wurde bereits mehrfach erprobt (SENGPIEL, HAAK, KIESSLING, REITMAYR) und verwendet zur Periodentrennung die Harmonische Analyse. Im Rahmen dieser Arbeit wurden dazu die Rechenprogramme umgeschrieben um sie dem neuen Digitalisierverfahren anzupassen, das Erkennen von Fehlern zu vereinfachen und die Gerätekonstanten auszugleichen.

Die Auswertung geschieht in folgenden Schritten:

1. Auswahl geeigneter Intervalle

Beim Auswählen der Intervalle wurde besonderer Wert darauf gelegt,
daß die Registrierungen des erdelektrischen und erdmagnetischen Feldes in dem Zeitraum störungsfrei sind,
daß in dem Intervall deutlich sichtbare Variationen enthalten sind und
daß die ausgewählten Perioden einer Station einigermaßen gleichmäßig über den gewünschten Periodenbereich verteilt sind. Der letzte Punkt wurde dadurch vereinfacht, daß die Intervallänge zwischen 240 und 3600 sec gewählt und so dem Periodeninhalt angepaßt werden konnte.

2. Digitalisierung.

Nachdem die Intervalle ausgewählt worden waren, wurden sie nach der im Kapitel IV beschriebenen Weise digitalisiert und in Lochstreifen gestanzt. Der Ab-

stand der Ablesungen wurde dabei so gewählt, daß auf die kürzeste Periode, die noch ausgewertet werden sollte, 3 bis 4 Ablesungen pro Schwingung entfallen. Bei der Digitalisierung vom Band war die Anzahl der Werte pro Schwingung wesentlich höher. Dabei macht die Tatsache, daß die Amplituden der registrierten Felder zu kurzen Perioden hin schnell abnehmen, ein Aliasing unwahrscheinlich.

3. Durchführung der Fourieranalyse.

Den so erhaltenen Datensätzen fügt man die notwendige Information über die Größe der Eichung, Intervallänge, Typ des Registrier-Geräts und die Zahl der gewünschten Fourierkoeffizienten hinzu.

Im Rechenprogramm werden dann der lineare Gang zwischen der ersten und der letzten Ablesung abgezogen und die abgelesenen Werte mit Hilfe des Eichfaktors normiert (inγ oder mV/km). Dann stellt eine vom Gerätetyp bestimmte Umpolung der Werte die geomagnetische Orientierung in allen Fällen richtig. Anschließend folgt die harmonische Analyse. Die sich dabei ergebenden Fourierkoeffizienten sind noch mit Fehlern aus der Übertragungs-Funktion des jeweiligen Registriergeräts behaftet. Die notwendigen Korrekturwerte werden der im Rechner gespeicherten komplexen Übertragungsfunktion sämtlicher Geräte entnommen. Die verbesserten Fourierkoeffizienten eines Feldes werden dann zusammen mit der Periode, der Nummer des Intervalls, dem Winkel der großen Halbachse der Ellipse und der Gerätenummer als Real- und Imaginärteil auf einer Lochkarte ausgestanzt.

4. Einteilung in Periodenintervalle.

Für die weitere Auswertung ordnet man die Fourierkoeffizienten jeder Station nach ihrer Periode. Dazu faßt man benachbarte Perioden jeweils zu Periodenintervallen zusammen. Die Einteilung der Intervalle erfolgt dabei angenähert logarithmisch. Die folgende Tabelle zeigt die einzelnen Intervalle und den zugehörigen Mittelwert, dem das Ergebnis dann zugeordnet wird.

Tabelle der Perioden-Intervalle:

Intervall	mittlere Periode
10 - 20 sec	15 sec
20 - 30 sec	25 sec
30 - 40 sec	35 sec
40 - 60 sec	50 sec
60 - 80 sec	70 sec
80 - 120 sec	100 sec
120 - 180 sec	150 sec
180 - 300 sec	240 sec
300 - 500 sec	400 sec
500 - 800 sec	600 sec
800 - 1200 sec	1000 sec
1200 - 1800 sec	1500 sec

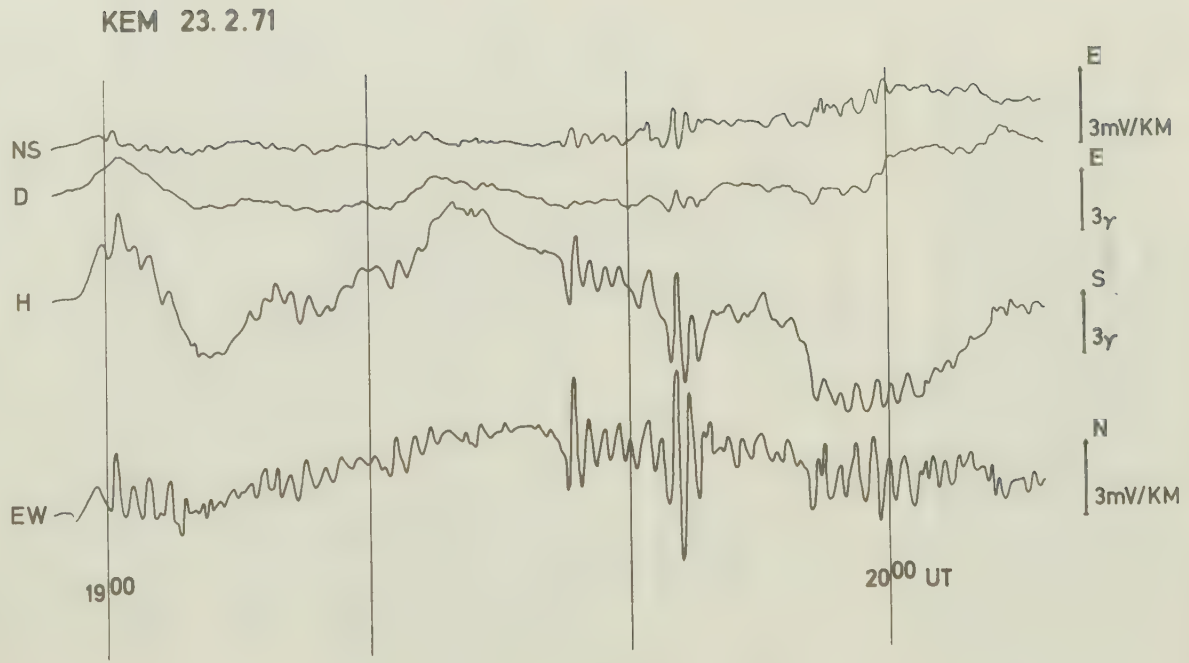

Abb. 21 Registrierungen an der Station KEM. Die beiden inneren Spuren sind die Komponenten des Magnetfeldes. H hat deutlich größere Amplituden als D.

D Die Beziehungen zwischen elektrischem und magnetischem Feld.

Die Magnetotellurik ermöglicht Aussagen über die Verteilung der Leitfähigkeit im Untergrund. Die Information erhält man aus der komplexen Übertragungsfunktion, also den Amplitudenverhältnissen und Phasenbeziehungen zwischen $\vec{E}$ und $\vec{F}$. Sie können zur Größe Z, dem Impedanztensor zusammengefaßt werden

$$\vec{E} = \{Z\} \cdot \vec{F} ;$$

$\vec{E}$ und $\vec{F}$ werden dabei in dieser Arbeit als die Fourier-Koeffizienten eines Frequenzintervalles verstanden, das durch Zerlegen des an den Stationen gemessenen, horizontalen elektrischen und magnetischen Feldes in Teilwellen der Form

$$E = E_o(\omega) \cdot e^{i\omega t - \varphi}$$

$$F = F_o(\omega) \cdot e^{i\omega t}$$

mit Hilfe der Fourierananlyse entstanden sind.

Daraus ergibt sich folgende tensorielle Beziehung

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_1 & z_2 \\ z_3 & z_4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix}$$

In dieser allgemeinen Form, die für eine dreidimensionale Leitfähigkeitsverteilung gilt, ist eine Interpretation der Meßergebnisse nicht möglich. Bei einer Variation der Leitfähigkeit in nur einer oder in zwei Dimensionen des Raumes hat der Tensor gewisse Symmetrieeigenschaften, die eine Interpretation ermöglichen.

Beim einfachsten Modell, dem sog. Cagniardschen Modell, hat der Untergrund homogene, ebene Schichtung. Die

Leitfähigkeit variiert also nur in der vertikalen Richtung. Für diesen Fall nimmt der Tensor folgende Form an:

$$Z = \begin{pmatrix} \emptyset & z \\ -z & \emptyset \end{pmatrix} \qquad \text{mit} \qquad z = \sqrt{\frac{\rho_s}{0{,}2 \cdot T}}$$

T = Periode der Variationen
ρ_s = scheinbarer spez. Widerstand.

In der üblichen Schreibweise erhält man für den scheinbaren spezifischen Widerstand

$$\rho_s = 0{,}2 \cdot T \cdot \left| \frac{E_x}{F_y} \right|^2$$

ρ_s = scheinb. spez. Widerstand in Ωm
T = Periode der Variationen in sec
E_x = elektr. Feldstärke in mV/km
F_y = magn. Feldstärke in γ .

E_x und F_y sind die gemessenen horizontalen Komponenten des elektrischen und magnetischen Feldes, die senkrecht aufeinander stehen müssen. Ein Hinweis, daß an einer Station die Cagniardschen Bedingungen wenigstens angenähert erfüllt sein könnten, wäre das Fehlen einer vom Untergrund bedingten Vorzugsrichtung (siehe Abschnitt E).

Der nächst einfache Fall ist der, daß die Leitfähigkeit in der vertikalen und in einer der beiden horizontalen Richtungen variiert, also die Beschränkung auf zwei Dimensionen. In diesem Modell sind die beiden horizontalen Richtungen nicht gleichwertig; in einer Richtung ist die Leitfähigkeit konstant, sie ist die Streichrichtung der Struktur.

Trifft dieses Modell zu, so gilt für die Komponenten der Felder

a) senkrecht zur Streichrichtung
   das elektrische Feld verändert sich an der Grenzfläche unstetig im Verhältnis der Widerstände;

   das magnetische Feld verändert sich unstetig im Verhältnis der Leitfähigkeiten;

b) parallel zur Streichrichtung
   das elektrische Feld variiert an der Grenze stetig;

   das magnetische Feld variiert an der Grenze stetig.

Für die Auswertung müssen deshalb die beiden Richtungen getrennt behandelt werden. Eine Auswertung ist in diesem Modell dann möglich, wenn die Richtungen des Koordinaten-Systems mit diesen Richtungen zusammenfallen. Unter dieser Einschränkung nimmt der Impedanztensor die Form

$$Z = \begin{pmatrix} \emptyset & z_{\parallel} \\ z_{\perp} & \emptyset \end{pmatrix}$$

an, wobei $z_{\parallel} = \frac{E_{\parallel}}{F_{\perp}}$ die zur Streichrichtung parallele und $z_{\perp} = \frac{E_{\perp}}{F_{\parallel}}$ die zur Streichrichtung senkrechte Impedanz bedeuten.

Es besteht nun die Aufgabe, aus dem Registriermaterial die für jeden Meßort und für jeden Periodenbereich durch die Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund, d.h. im tatsächlich wirksamen Induktionsraum, dessen Größe mit zunehmender Periode monoton wächst, gegebene Streichrichtung zu finden.

B Beschreibung des Auswerteverfahrens.

Die weitere Bearbeitung der Meßdaten schließt sich an eine von HAAK vorgeschlagene Methode an (HAAK 68 und HAAK 70).

Ausgangspunkt sind hierbei die Fourier-Koeffizienten jeder Station, eingeteilt in Perioden-Intervalle. Sie stellen für jedes Perioden-Intervall eine Folge von N Zahlen dar, wobei N die Anzahl der Fourierkoeffizienten ist. Bei dieser Methode soll der Fehler möglichst gering gehalten werden, indem
a) durch Anwenden der Methode der kleinsten Quadrate ein Ausgleich der Meßfehler erfolgt
b) versucht wird, für jedes Perioden-Intervall aus dem vorliegenden Meßmaterial die tatsächlich wirksame Streichrichtung zu finden und so im optimal an die Theorie angepaßten Koordinatensystem zu arbeiten.

Zur Berechnung der Streichrichtung dient die Größe der Kohärenz. Die Kohärenz zwischen zwei Folgen von Zahlen ist definiert als

$$KOH = \frac{C_{xy}^2 + S_{xy}^2}{C_{xx} \cdot C_{yy}} \qquad \text{(KERTZ 1970)}$$

C_{xy} = Wirkspektrum der beiden Zahlenfolgen
S_{xy} = Blindspektrum der beiden Zahlenfolgen
C_{xx}, C_{yy} = Powerspektren der beiden Folgen.

Die Kohärenz kann zwischen 0 und 1 liegen und stellt ein Maß dar für die linearen Beziehungen zwischen den beiden Zahlenfolgen.

Um die Streichrichtung zu bestimmen, berechnet man die Kohärenz zwischen den Folgen von Fourierkoeffizienten der EW-Komponente und der NS-Komponente

des elektrischen Feldes innerhalb eines Periodenbereiches, dreht anschließend das Koordinatensystem und errechnet in der neuen Richtung die Kohärenz. Dies geschieht in Schritten von zwei Grad solange bis eine Drehung um 90° erreicht ist. Man erhält so die Kohärenz als Funktion des Azimuts der Meßaufstellung. Im Falle einer angenähert zweidimensionalen Struktur zeigt sich ein deutliches Minimum. Dieses Minimum gibt im Rahmen statistischer Genauigkeit die Lage des Koordinatensystems an, das nach der Streichrichtung der zweidimensionalen Verteilung der Leitfähigkeit ausgerichtet ist.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das oben beschriebene Verfahren auch auf die Fourier-Koeffizienten des Magnetfeldes angewandt und die Kohärenz zwischen den Komponenten H und D bestimmt. Auch hier ergaben sich Minima, die denen des elektrischen Feldes gleichen und die Hauptanregungsrichtung des Magnetfeldes markieren. Siehe hierzu Abb. 22.

Als nächstes wird das Koordinatensystem des elektrischen Feldes in die Richtung minimaler Kohärenz gedreht. Zu diesen neu bestimmten Komponenten des elektrischen Feldes, die in die durch die Leitfähigkeitsverteilung im Induktionsraum ausgezeichneten Richtungen weisen, gilt es, das optimale Koordinatensystem des Magnetfeldes zu bestimmen, d.h. diejemigen Richtungen des Magnetfeldes zu finden, die die Variationen des elektrischen Feldes tatsächlich induziert haben.

Dazu wird das elektrische Feld in Richtung minimaler Kohärenz festgehalten. Man berechnet sodann die Kohärenz zwischen jeweils einer Komponente des elektrischen Feldes und H, der NS-Komponente des Magnetfeldes, bzw. D, der EW-Komponente. Dann dreht

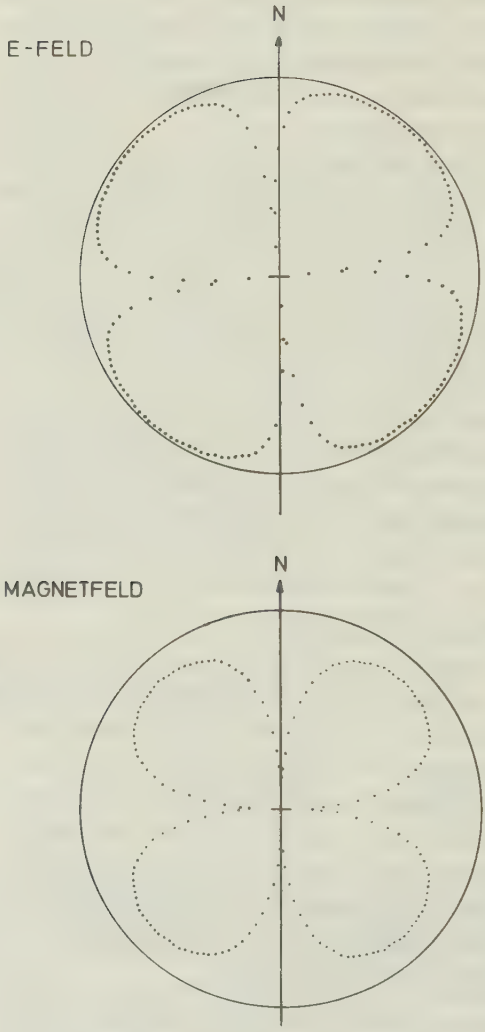

Abb. 22 Figuren minimaler Kohärenz an der Station KEM für die mittlere Periode von 150 sec.

man die Komponenten des Magnetfeldes um 2° und führt die gleiche Berechnung in der neuen Richtung durch. Dies geschieht bis ein Winkel von 180° erreicht ist. Die Richtung des Maximums der Kohärenz gibt an, in welche Richtung das Koordinatensytem des Magnetfeldes gedreht werden muß, um den besten kausalen Zusammenhang mit den ausgezeichneten Komponenten des elektrischen Feldes zu erhalten.

Der Winkel zwischen den zusammengehörenden Komponenten des elektrischen und magnetischen Feldes ist hierbei im allgemeinen weder genau 90°, noch wird das Maximum der Kohärenz für beide Komponenten des magnetischen Feldes beim gleichen Winkel erreicht. Im Rahmen dieser Auswertung wurde die Orthogonalität der beiden Komponenten des magnetischen Feldes und die der beiden Komponenten des elektrischen Feldes gewahrt, doch durfte der Winkel zwischen den Komponenten des elektrischen und magnetischen Feldes, die aufeinander bezogen werden sollten, durchaus von 90° abweichen. Die Richtung des Koordinatensystems des magnetischen Feldes ergab sich aus der Lage desjenigen Maximums der Kohärenz,das sich aus den Komponenten des elektrischen und magnetischen Feldes mit der größeren Amplitude ableitete. Diese waren im vorliegenden Meßgebiet im Magnetfeld etwa die NS- und im elektrischen Feld etwa die EW-Komponente.

Zur Berechnung des Amplituden-Verhältnisses und der Phasendifferenz zwischen elektrischem und magnetischem Feld werden nun die Koordinatensysteme jeweils in die mit Hilfe der Methode der minimalen und maximalen Kohärenz gefundenen Richtungen gedreht und mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate der wahrscheinlichste Wert bestimmt.

F Die Vorzugsrichtungen.

Setzt man die beiden Horizontalkomponenten des erdelektrischen Feldes zu einem Vektordiagramm zusammen, so erhält man für eine Variation im allgemeinen schlanke, Ellipsen-ähnliche Figuren. Der Mittelwert der Hauptachsen dieser Ellipsen wird als Vorzugsrichtung des elektrischen Feldes definiert (ANGENHEISTER, BERKTOLD,SENGPIEL 1965, HAAK 70). Ein Beispiel dafür zeigen die Abb. 23a,b und 24a,b.

Eine andere Definition der Vorzugsrichtung, die sich besser in die hier beschriebene Auswertemethode einfügt, bezieht sich auf die Fourierkoeffizienten des analysierten Intervalles und lautet:
Als Vorzugsrichtung gilt der mit der Amplitude bewichtete Mittelwert der Winkel, den die große Halbachse der Ellipsen, die man aus den einzelnen Fourierkoeffizienten jeder Harmonischen konstruiert, mit der Nordrichtung einschließt (REITMAYR 1971).

Als dritte Methode, die Vorzugsrichtung zu bestimmen und zugleich die Methode, die in dieser Arbeit benutzt wurde, sei die Methode der minimalen Kohärenz genannt.

Dazu verwendet man die komplexen Fourierkoeffizienten einer Station und eines Perioden-Intervalles. Berechnet man die Kohärenz zwischen den Folgen der Fourierkoeffizienten der EW- und der NS-Komponente als Funktion des Azimutes der Meßaufstellung, so läßt sich meist ein gut ausgeprägtes Minimum erkennen. Dieses Minimum fällt mit der Vorzugsrichtung des elektrischen Feldes an dieser Station zusammen (HAAK 68).

In keiner dieser Definitionen der Vorzugsrichtung ist hierbei eine Aussage über das anregende Mag-

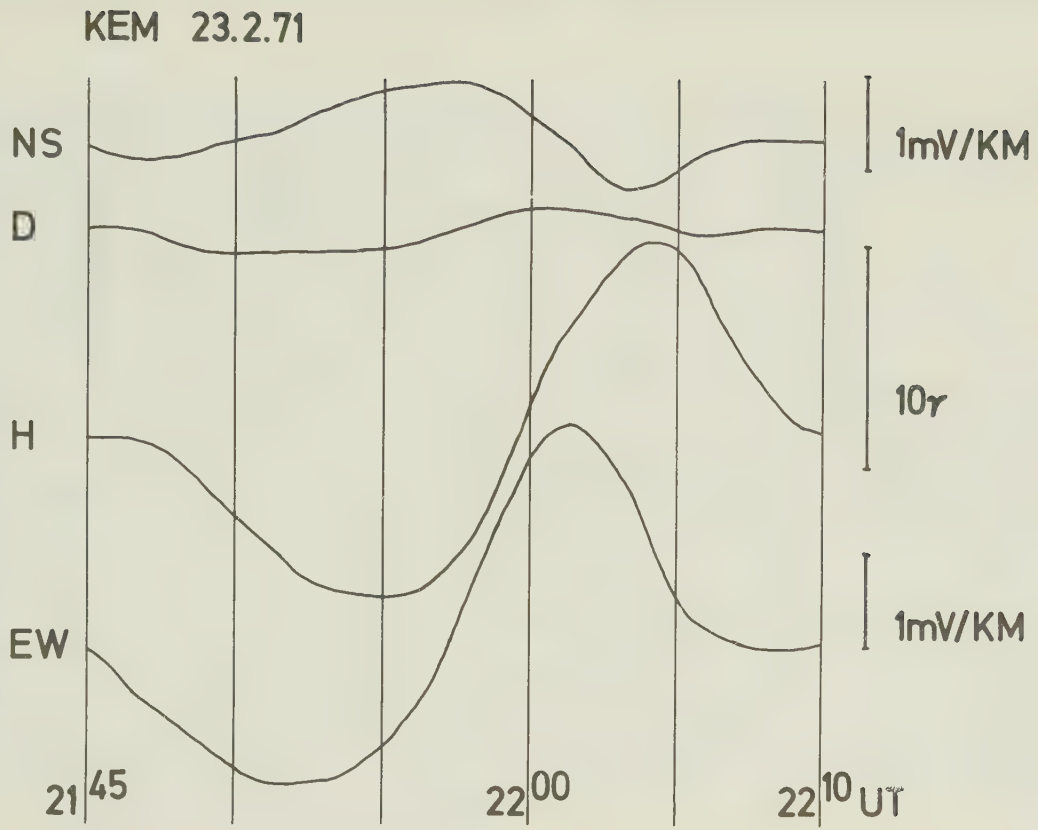

Abb. 23a Registrierungen des erdelektrischen und erdmagnetischen Feldes an der Station KEM.

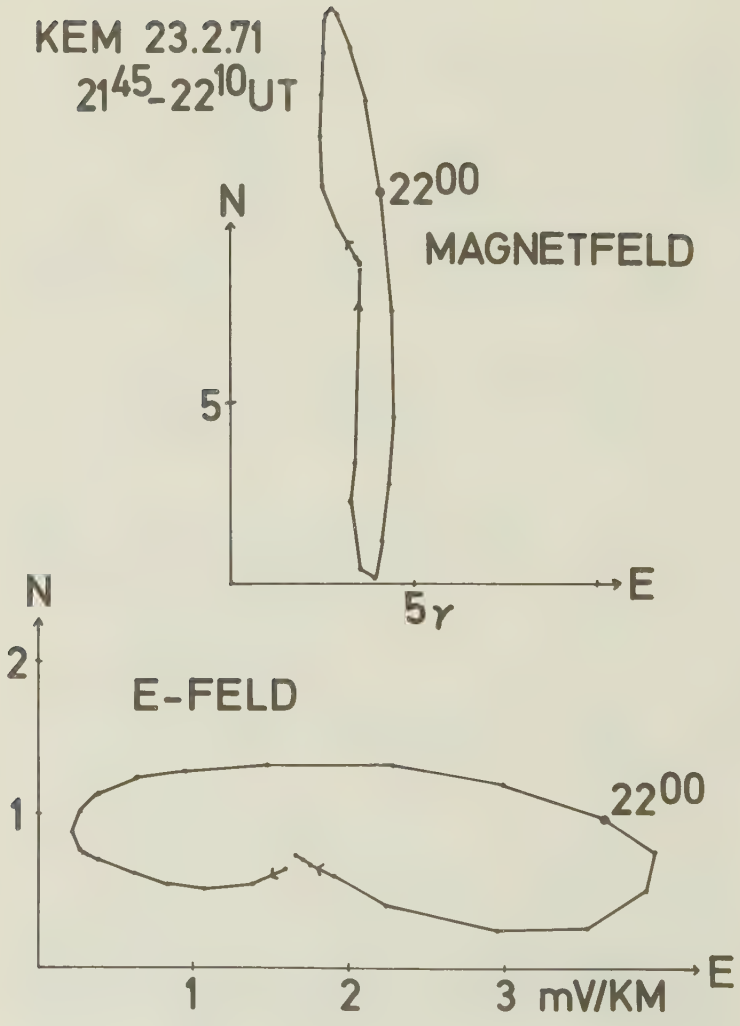

Abb. 23b Vektordiagramm der Registrierungen an der Station KEM von Abb.23a. Die Polarisationsrichtung des Magnetfeldes ist NS.

netfeld gemacht. Soll für die so eingeführte Vorzugsrichtung die Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund verantwortlich gemacht werden, so muß man voraussetzen, daß das Magnetfeld keine Anregungsrichtung bevorzugt. Diese Annahme mag für mittlere Breiten gültig sein, ist jedoch in dem hier gegebenen Meßgebiet nahe dem magnetischen Äquator nicht erfüllt.

Hier ist die bevorzugte Anregungsrichtung NS. Dies erkennt man an den Registrierbeispielen Abb. 21, Abb. 23a und Abb.24a, noch deutlicher an den Vektordiagrammen Abb. 23b und 24b. Die große Halbachse der Ellipsen-ähnlichen Figuren zeigt fast genau nach Norden. Auch die Figuren der minimalen Kohärenz des Magnetfeldes zeigen scharfe Einschnitte, die auf diese bevorzugte Anregungsrichtung hinweisen.

Wie wirkt sich nun diese Erscheinung auf das elektrische Feld aus? Im Cagniardschen Modell müssen die Variationen des Magnetfeldes und die durch sie induzierten Variationen des elektrischen Feldes aufeinander senkrecht stehen. Dies hat zur Folge, daß in diesem Modell das elektrische Feld senkrecht zur Hauptanregungs-Richtung des Magnetfeldes polarisiert ist. Wendet man unter diesen Voraussetzungen die auf der letzten Seite gegebenen Definitionen der Vorzugsrichtung an,so erhält man als Vorzugsrichtung eine Größe, die nur eine Funktion des anregenden Feldes ist.

Als Beispiel für einen solchen Fall sei die Station KEM genannt (siehe Abb. 25). In diesem Bild sind die Richtungen minimaler Kohärenz, berechnet für jeden Periodenbereich und getrennt für das elektrische und das magnetische Feld als Funktion der Periode aufgetragen. Die beiden unteren Punktreihen sind

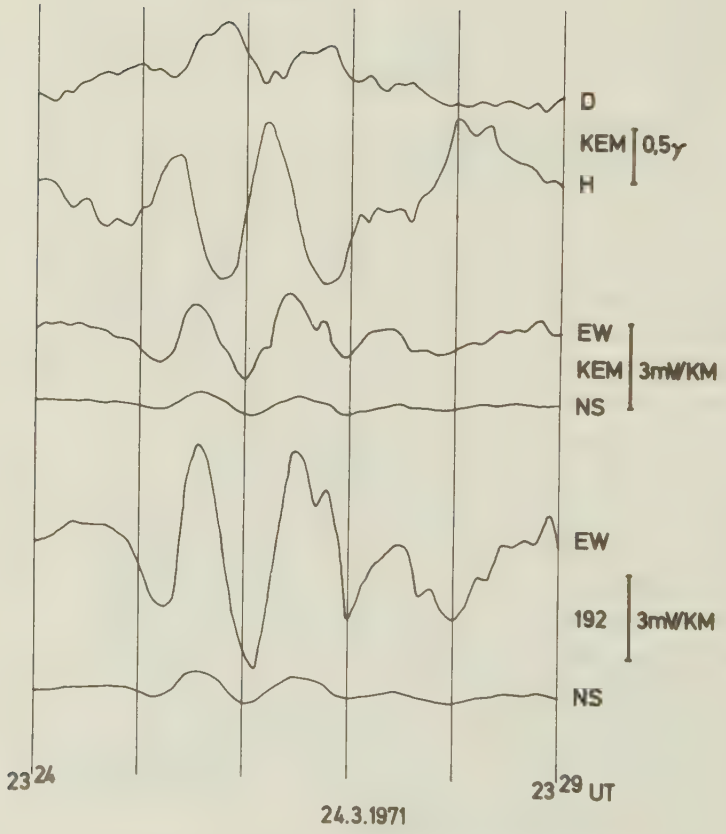

Abb. 24a Gleichzeitige Registrierungen des magnetischen und des elektrischen Feldes an der Station KEM und des elektrischen Feldes an der Station 192.

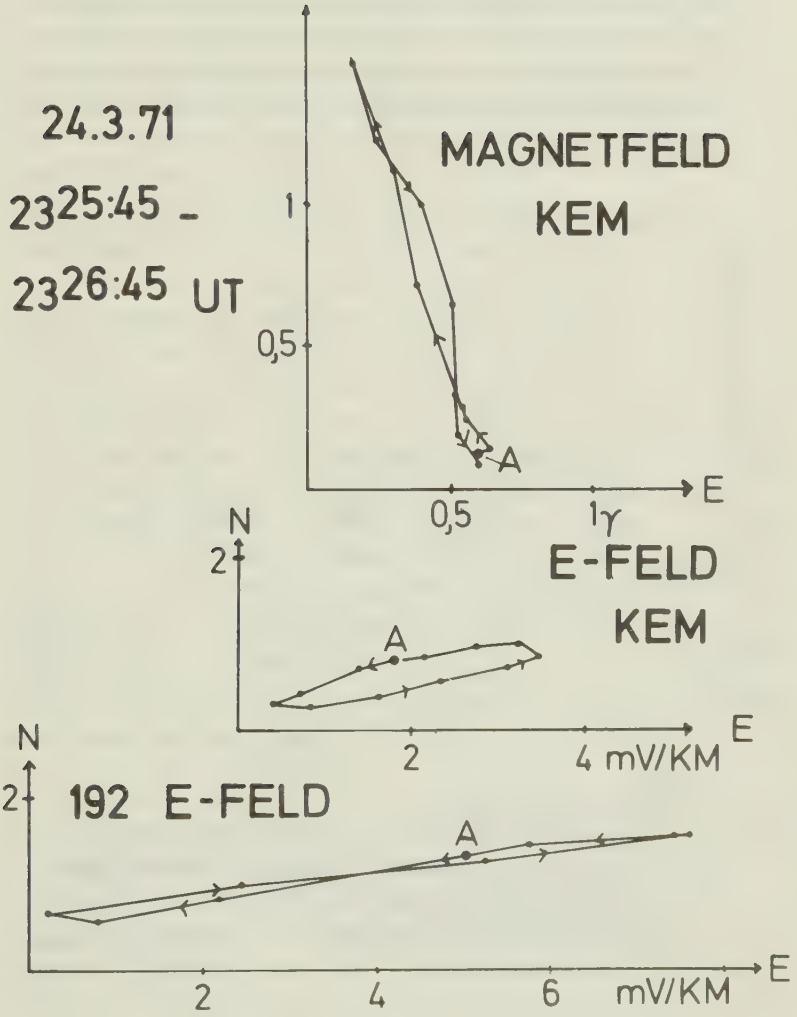

Abb. 24b Vektordiagramm der in Abb. 24a gezeigten Registrierungen an den Stationen KEM und 192.

für die Station KEM gültig. Sehr gut zu erkennen ist, daß die Vorzugsrichtung des elektrischen Feldes im gesamten hier ausgewerteten Periodenbereich mit nur minimalen Abweichungen senkrecht zur Haupt-Anregungsrichtung des magnetischen Feldes liegt.

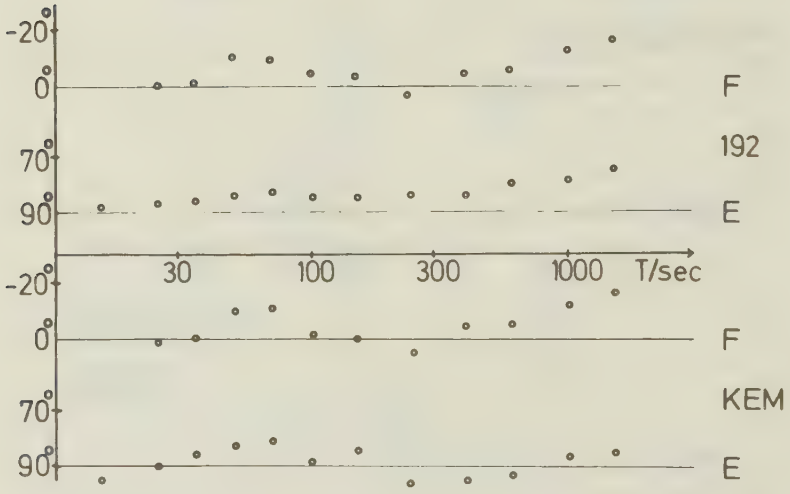

Abb. 25 Richtung minimaler Kohärenz an den Stationen KEM und 192 getrennt berechnet für das elektrische und das magnetische Feld jedes Periodenintervalles aufgetragen in Abhängigkeit von der Periode.

Die Schwankungen der Hauptanregungs-Richtung des Magnetfeldes als Funktion der Periode sind bedingt durch die zufällige Auswahl der Intervalle. Bei der Station 192 hingegen haben bei kurzen Perioden die variierenden Hauptanregungsrichtungen des Magnetfeldes keinen wesentlichen Einfluß auf die Vorzugsrichtung an dieser Station.

Sehr viel deutlicher zeigt sich dieser letztere Sachverhalt in Abb. 26, die die Häufigkeitsverteilungen der Polarisations-Richtungen im elektrischen und magnetischen Feld zeigt. Die beiden äußeren senkrechten Reihen zeigen die Verteilungen im Magnetfeld, die beiden inneren im elektrischen Feld. Während an der Station KEM bei allen Perioden-Intervallen die Ausbildungen der Häufigkeitsverteilung in etwa gleich sind, gilt dieser Sachverhalt bei der Station 192 nur für die beiden längeren Periodengruppen. Bei den kurzen Perioden erkennt man eine deutliche Anhäufung der Polarisationen des E-Feldes auf einen schmalen Winkelbereich.

Dies bedeutet, daß hier zusätzlich zu einer durch die Anregung bedingten Anhäufung eine durch die Verteilung der Leitfähigkeit im Untergrund bedingte Vorzugsrichtung besteht. Man muß deshalb, wenn die Vorzugsrichtung nur durch die Struktur des Untergrundes erzeugt werden soll, eine Definition einführen, die die Polarisationsrichtungen des Magnetfeldes mit einbezieht. Diese könnte folgendermaßen lauten:

Trägt man die Richtungen der großen Halbachsen der aus den Fourierkoeffizienten gebildeten Ellipsen eines Perioden-Intervalles des gleichzeitig registrierten elektrischen und magnetischen Feldes

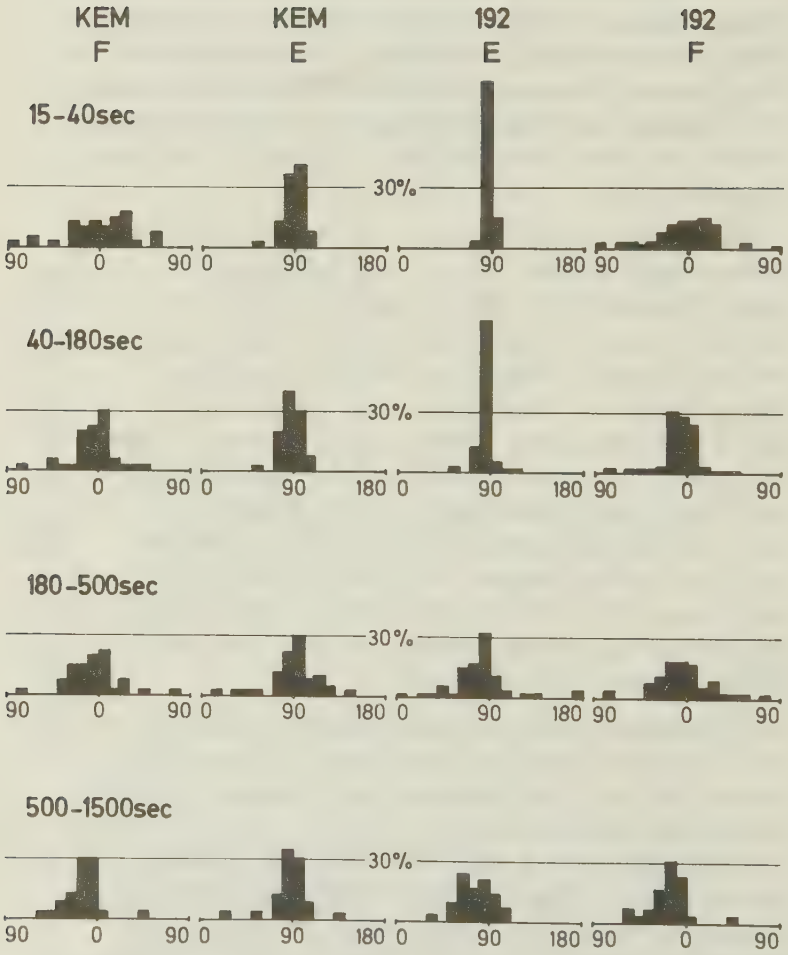

Abb. 26 Häufigkeitsverteilungen der Polarisationsrichtungen des erdelektrischen und erdmagnetischen Feldes an den Stationen KEM und 192. Die Einteilung erfolgte in Klassen von je 10°. "0" entspricht der NS-Richtung, "90" der EW-Richtung. Das Magnetfeld zu 192 wurde in KEM gemessen.

als Funktion ihrer Richtung in zwei getrennten Diagrammen auf, so erhält man im elektrischen Feld im allgemeinen ein deutlich ausgeprägtes Häufigkeitsmaximum. Die Richtung dieses Maximums nennt man Vorzugsrichtung. Eine Folge der Verteilung der Leitfähigkeiten im Untergrund ist sie nur dann, wenn

a) entweder im Magnetfeld kein ausgeprägtes Häufigkeitsmaximum besteht oder
b) der Winkel zwischen den Häufigkeitsmaxima deutlich von 90^{o} abweicht oder
c) die Halbwertsbreite des Häufigkeitsmaximums im E-Feld deutlich geringer ist als im magnetischen Feld.

Der Vorteil dieser Definition ist darin zu sehen, daß sie zwischen den beiden möglichen Ursachen einer Vorzugsrichtung unterscheidet, ohne von der idealisierten Vorstellung einer Gleichverteilung der Anregungsrichtungen auszugehen, die im Rahmen einer Auswertung nie streng zu verwirklichen ist. Sie stützt sich auf das tatsächlich vorliegende Registriermaterial und läßt eine subjektive Auswahl der zur Auswertung herangezogenen Intervalle zu. Punkt c ermöglicht in unserem Falle die vom Untergrund bedingte Vorzugsrichtung zu erkennen!

Die folgende Tabelle enthält das Verhältnis der Halbwertsbreiten der Häufigkeitsmaxima des elektrischen Feldes zu denen des magnetischen Feldes an beiden Stationen.

T	192	KEM
15 - 40	0,35	0,60
40 - 180	0,50	0,85
180 - 500	0,80	0,80
500 - 1500	1,10	0,95

Von einer durch den Untergrund bedingten Vorzugsrichtung kann man nur bei der Station 192 und auch hier nur im Periodenbereich zwischen 15 und 180 sec sprechen. Die Vorzugsrichtung ist 87°. Zur Veranschaulichung sind in Abb. 27 noch einmal die Polarisationsrichtungen des elektrischen Feldes jeder einzelnen aus den Fourierkoeffizienten gebildeten Ellipse eingetragen. Die Abnahme der Streuung zu kurzen Perioden hin ist deutlich sichtbar.

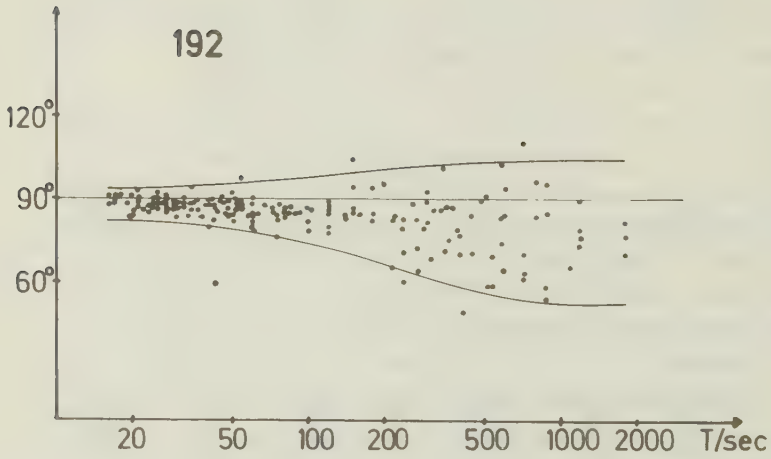

Abb. 27 Polarisationsrichtungen des elektrischen Feldes an der Station 192.

Für die Zunahme der Streuung mit zunehmender Periode in Abb. 27 sind zwei Gründe denkbar:
a) Die Station 192 steht im Gebiet einer kleinräumigen Struktur, die die Vorzugsrichtung bestimmt. Mit zunehmender Periode und wachsendem Induktionsraum wird ihr Einfluß geringer und die Vorzugsrichtung verschwindet.
b) In größerer Tiefe existiert eine Schicht guter Leitfähigkeit und ohne Anisotropierichtung. Sobald diese Schicht die Leitfähigkeit im wirksamen Induktionsraum überwiegend bestimmt, wird keine Vorzugsrichtung mehr beobachtet.

G Ergebnisse der Auswertung.

Nach der in Abschnitt E beschriebenen Methode wurden die Fourierkoeffizienten der einzelnen Periodenintervalle des E-Feldes in die Richtung minimaler Kohärenz gedreht, diejenigen des Magnetfeldes in die Richtungen dazu maximaler Kohärenz und dann mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate die beste Näherung des Amplituden-Verhältnisses bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabellenform zusammengefaßt und sollen kurz besprochen werden (siehe S.95).

In Spalte 1 ist für jedes Perioden-Intervall die mittlere Periode eingetragen, auf die das Ergebnis bezogen wurde.
In Spalte 2 ist die Anzahl der für die Auswertung in diesem Perioden-Intervall zur Verfügung stehenden komplexen Fourierkoeffizienten aufgeschrieben. Bei den langen Perioden ist die Anzahl der Koeffizienten besonders an der Station KEM sehr gering.
Spalte 3 enthält die Winkel der minimalen Kohärenz des elektrischen Feldes. Der Winkel wird von der

Nordrichtung aus im Uhrzeigersinn gezählt. Unterstrichen sind dabei an der Station 192 diejenigen Werte, die durch die Leitfähigkeits-Verteilung im Untergrund bestimmt sind.
Aus Spalte 4 ersieht man die Richtung minimaler Kohärenz im Magnetfeld. Sie gibt in etwa die Hauptpolarisationsrichtung der ausgewählten Intervalle und damit die für die Auswertung gültige Hauptanregungsrichtung an. Die Werte der Spalten 3 und 4 sind in Abb. 25 als Funktion der Periode aufgetragen. Spalte 5 enthält den Winkel, bei dem das magnetische Feld maximale Kohärenz zum elektrischen Feld hat. Die Differenz der Spalten 4 und 5 ist gleich dem Winkel zwischen den aufeinander bezogenen Komponenten des elektrischen und magnetischen Feldes. Spalte 6 nennt den Betrag der Impedanz der sich zwischen der Komponente des E-Feldes in Richtung minimaler Kohärenz, also ungefähr EW, und der Magnetfeldkomponente maximaler Kohärenz dazu, also ungefähr NS (siehe Abb.28 und 29) ergibt. Spalte 7 schließlich enthält die Phasendifferenz zwischen beiden Komponenten. Die Phasen wurden direkt aus den Registrierungen bestimmt. Sie sind in Abb. 30 aufgetragen.

Für eine allererste Interpretation wurde der scheinbare spezifische Widerstand nach CAGNIARD an beiden Stationen berechnet und als Funktion der Periode aufgetragen (siehe Abb. 28 und 29). Dies scheint erlaubt, da an der Station KEM keine merkliche, vom Untergrund bedingte Vorzugsrichtung existiert und diese an der Station 192 auf die kurzen Perioden beschränkt bleibt.

1 Periode	2 Anzahl	3 Kohmin in E	4 Kohmin in F	5 Kohmax in F	6 Betrag der Impedanz ($\Omega.10^{-4}$)	7 Phase
Station KEM :						
1500	4	85°	-16°	-16°	0,5	38°
1000	8	87°	-12°	-10°	0,2	45°
600	11	93°	- 5°	- 8°	0,5	48°
400	21	95°	- 4°	-28°	0,7	56°
240	19	96°	+ 5°	+12°	1,1	58°
150	8	85°	0°	-20°	1,8	65°
100	6	90°	- 1°	+ 4°	1,3	62°
70	9	81°	-11°	- 9°	1,8	68°
50	13	83°	-10°	- 8°	2,5	66°
35	15	86°	0°	- 4°	2,8	66°
25	21	90°	+ 2°	+10°	2,5	-
15	5	95°	-24°	+30°	3,8	-
Station 192 :						
1500	5	74°	-15°	-15°	0,8	40°
1000	10	79°	-12°	-12°	0,9	45°
600	14	80°	- 5°	- 2°	1,0	38°
400	27	84°	- 4°	+ 4°	1,3	48°
240	26	84°	+ 4°	-20°	1,3	50°
150	13	85°	- 3°	-20°	1,8	55°
100	12	85°	- 4°	+24°	2,9	60°
70	16	83°	- 9°	-10°	4,0	54°
50	26	84°	-10°	- 6°	4,4	56°
35	28	86°	- 1°	+ 2°	5,2	-
25	27	87°	0°	+20°	5,6	-
15	8	89°	-38°	+10°	9,0	-

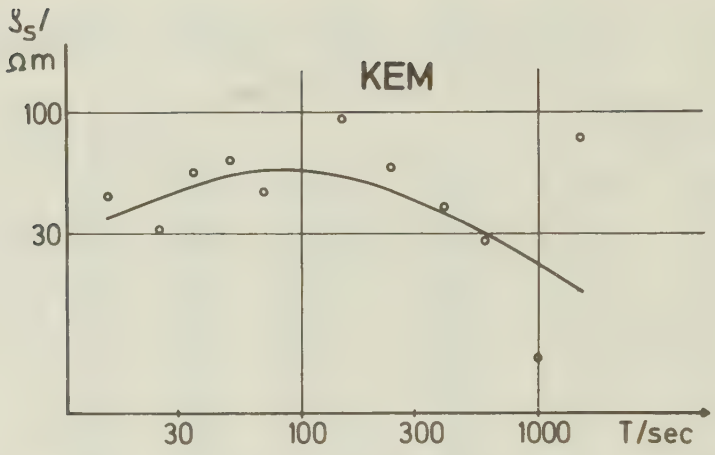

Abb. 28 Verlauf des scheinbaren spezifischen Widerstandes nach CAGNIARD an der Station KEM.

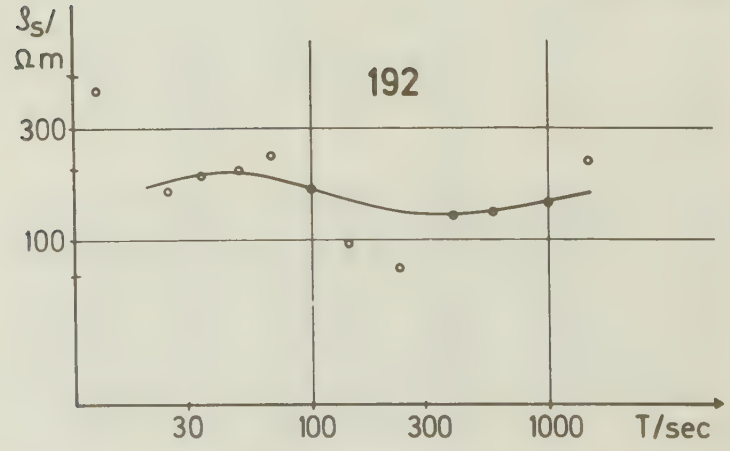

Abb. 29 Verlauf des scheinbaren spezifischen Widerstandes nach CAGNIARD an der Station 192.

Für die erhaltenen Kurven des scheinbaren spez. Widerstandes wurde mit Hilfe von 4-Schicht-Modellkurven (berechnet von Latka 1966) eine Interpretation durchgeführt. Diese ergab folgenden Schichtaufbau unter den beiden Stationen:

KEM	192
ϱ_1 = 20 Ωm d_1 = 2 km	ϱ_1 = 150 Ωm d_1 = 7 km
ϱ_2 = 200 Ωm d_2 = 6 km	ϱ_2 = 1500 Ωm d_2 = 7 km
ϱ_3 = 20 Ωm d_3 = 6 km	ϱ_3 = 15 Ωm d_3 = 3 km
ϱ_4 = 2 Ωm d_4 = ∞	ϱ_4 = 150 Ωm d_4 = ∞

Der auffallendste Unterschied der Modelle an beiden Stationen ist : unter einer gutleitenden Zwischenschicht in ca. 15 km Teufe nimmt der Widerstand an der Station 192 wieder zu, während er an der Station KEM abnimmt. Dies könnte wie folgt begründet werden: an der Station KEM ist wegen des allgemein höheren Widerstandes die Eindringtiefe von Variationen mit gleicher Periode kleiner, sodaß diese Schicht noch nicht von dem ausgewerteten Periodenbereich erfaßt wird.

Einen Hinweis darauf geben die Kurven der Phasen von ϱ_s ; Die Phasendifferenz $\varphi_{Ex} - \varphi_{Hy}$ nimmt an beiden Stationen mit zunehmender Periode ab, was auf einen schlechten Leiter hindeutet.

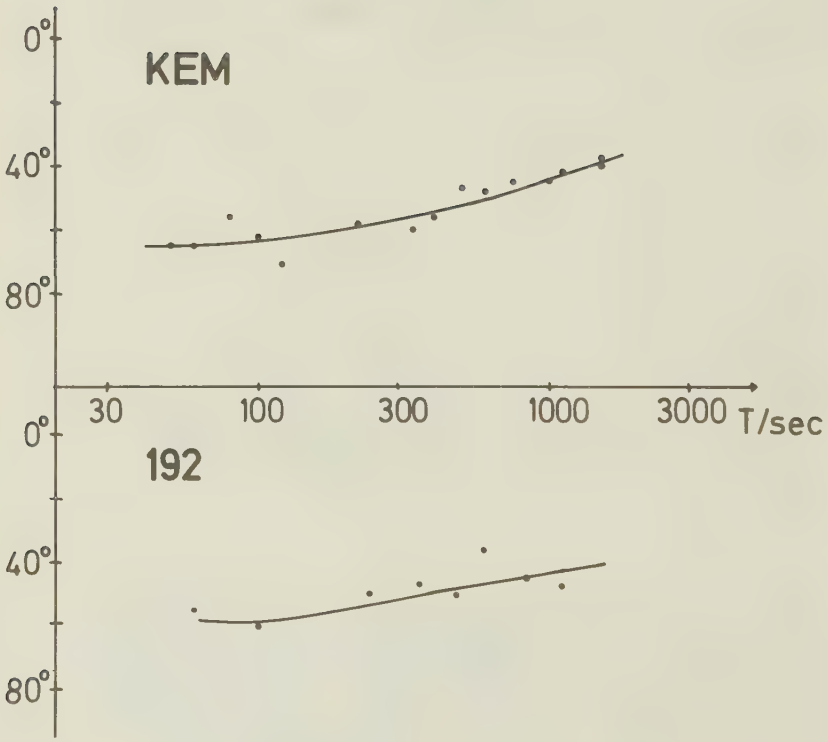

Abb. 30 Phasenbeziehung $\varphi_E - \varphi_H$ zwischen der EW-Komponente des elektrischen Feldes und der NS-Komponente des magnetischen Feldes an den Stationen KEM und 192.

Zusammenfassung.

In der vorliegenden Arbeit wird der Bau von Geräten beschrieben, die zur Registrierung der Variationen
a) des erdmagnetischen Feldes
b) des erdelektrischen Feldes dienen.
Im weiteren wird der Vorgang der Digitalisierung der gewonnenen Meßdaten erläutert und eine Auswertung von Registrierungen an zwei Stationen aus dem Gebiet der Afarsenke (Äthiopien) durchgeführt.
Die einzelnen Abschnitte werden im folgenden näher erläutert.

Zum Messen der Magnetfeld-Komponenten werden Saturationskern-Magnetometer benutzt. Sie ermöglichen eine Empfindlichkeit von ca. 0,1γ. Die absolute Genauigkeit ist geringer, da äußere Einflüsse den Nullpunkt um 1 bis 2γ verschieben können. Diese Angaben beziehen sich auf einen Meßbereich von ± 100γ.

Damit das Signal mit Registriergeräten, deren Amplitudenumfang nur 40 dB ist, aufgezeichnet werden kann, wird die Abhängigkeit der Amplituden von der Periode ausgenützt und das Signal durch ein Hochpaßfilter in zwei getrennte Teile aufgespalten, einen langperiodischen und einen kurzperiodischen und dann getrennt registriert.

Zum Registrieren des elektrischen Feldes wurde ein Gerät entwickelt, daß aus einem Akku betrieben wird und ein Eigenrauschen von 2 μV und eine Drift pro Monat von 20 μV erzeugt. Die Empfindlichkeit für den Vollausschlag kann zwischen 30 μV und 5 mV eingestellt werden. Zur Kompensation der elektrochemischen Felder dient eine Gleichspannungs-Kompensation und ein Hochpaßfilter mit einer Grenz-

frequenz von 5000 sec. Die Registrierung der Meßdaten erfolgt durch ein batteriebetriebenes, analoges Magnetbandgerät.

Zur Zeitmarkierung werden zwei Systeme benutzt. Auf einem Kanal des Bandgerätes werden die Minuten- und Stundenmarken einer Uhr registriert, auf einem anderen, das Zeitzeichen des Senders HBG.

Die Digitalisierung der registrierten Meßdaten geschieht mit zwanzigfacher Zeitraffung auf Lochstreifen. Als Auslöseimpuls für die Ablesung dient dabei das aufgespielte Zeitzeichen des Senders.

Die ausgewählten Intervalle werden Fourier-analysiert und die Koeffizienten in Frequenz-Intervalle eingeteilt. Sodann können die Amplituden- und Phasenänderungen, die durch die in die Aufnahmegeräte eingebauten Filter und durch die Digitalisierung verursacht worden sind, in einem Rechenprogramm wieder rückgängig gemacht werden.

Im letzten Teil der Arbeit werden zwei Stationen eines Einsatzes der Geräte in der Afarsenke ausgewertet. Dabei wird das Problem der Überlagerung der durch den Untergrund bedingten Vorzugsrichtung durch eine überwiegende Polarisations-Richtung des magnetischen Feldes (NS) diskutiert.

Die Registrierungen beider Stationen wurden mit einem Vierschicht-Modell nach CAGNIARD ausgewertet. Das Ergebnis der Auswertung dieses Modelles ist: unter beiden Stationen scheint eine gutleitende Schicht in ca. 15 km Tiefe zu existieren.

Literaturverzeichnis:

ANGENHEISTER, G. : Registrierungen erdmagnetischer Pulsationen, Göttingen 1952/53. Gerlands Beiträge z. Geophys. 64, Heft 2, 1954, S. 108 - 132.

ANGENHEISTER, G., A.Berktold, K.P. Sengpiel : Die zeitlichen Variationen des erdelektrischen Feldes, beobachtet längs eines NS-Profiles vom Kristallin des Bayerischen Waldes durch das Alpenvorland bis zum Nordrand der Alpen. Bayer. Akad. d. Wiss., Math.-Naturw. Kl., Sonderdruck 7, 1965.

ASCHENBRENNER, H., G.GOUBAU : Eine Anordnung zur Registrierung rascher magnetischer Störungen. Hochfrequenztechnik und Elektroakkustik, 47, 1936, S. 177-181.

BEBLO, M. : Ein neuer Elektrograph zur Registrierung der natürlichen Variationen des induzierten erdelektrischen Feldes. Dipl.-Arbeit,Inst. f. Angew. Geophys. Univ. München, 1971.

BERKTOLD, A. : Tiefensondierung mit Hilfe der Variationen des erdmagnetischen und erdelektrischen Feldes längs eines Profiles vom Oberpfälzer Wald durch das nördliche Alpenvorland bis zu den Kitzbüheler Alpen. Diss. Naturw. Fak. Univ. München, 1969.

BLACKMAN, R.B., J.W.TUKEY : The measurement of powerspectra. New York, 1959.

CAGNIARD, L. : Basic theory of the magnetotelluric method. Geophysics 18, 1953, S. 605-635.

FANSELAU, G : Geomagnetismus und Aeronomie, Bd. II. VEB Deutscher Verlag der Wiss., Berlin 1960.

FELDTKELLER, R. : Zur Berechnung von Magnetfeldmeßgeräten mit Förstersonden. Schriften der Deutsch. Akad. f. Luftfahrtforschung, Berlin 1943, S. 1-42.

FÖRSTER, F. : Ein Verfahren zur Messung von Gleichfeldern und Gleichfelddifferenzen und seine Anwendung in der Metallforschung und Technik. Zeit. f. Metallkunde 46, 1955, S. 358-370.

GOMER, L.D. : Magnetic tape instrumentation. Mc Graw-Hill Book Company Inc., New York 1961.

GREINWALD, S. : Die neue Apparatur des Instituts für Angewandte Geophysik der Universität München zur Aufzeichnung der natürlichen Schwankungen des erdelektrischen Feldes. Dipl.-Arb. Inst. f. Angew. Geoph. Univ. München, 1967.

GREINWALD, S. : Aufzeichnung von Variationen des erdelektrischen und erdmagnetischen Feldes auf Magnetband. Protok. Erdmagn. Tiefens. Reinhausen, 1969,S.197-204.

GREINWALD, S. : Ein batteriebetriebenes Dreikomponenten-Oerstedtmeter. Protok. Erdmagn. Tiefens. Rothenberge, 1971, S. 100-104.

HAAK, V. : Beschreibung und Anwendung von Verfahren zur Auswertung von Registrierungen des erdelektrischen Feldes längs eines Profils durch die Westhälfte des Rheingrabens. Dipl. Arb., Inst. f. Angew. Geoph. Univ. München, 1968.

HAAK, V. : Das zeitlich sich ändernde, erdelektrische Feld, beobachtet auf einem Profil über den Rheingraben; eine hiervon abgeleitete Methode der Auswertung mit dem Ziel die elektrische Leitfähigkeit im Untergrund zu bestimmen. Diss. Naturw. Fak. Univ. München, 1970.

HAAK, V., K.P. SENGPIEL, A.BERKTOLD, S. GREINWALD : The telluric method: Results of the measurement along a profile across the Rhinegraben between Stuttgart and Kaiserslautern. Graben Problems, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart,1970.

KERTZ, W. : Einführung in die Geophysik. Bd. I und II, Bibliographisches Institut Mannheim, Wien, Zürich, 1969 und 1971.

KIESSLING, W. : Untersuchung der Variationen des erdelektrischen und erdmagnetischen Feldes im Oberpfälzer Wald zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit in größeren Tiefen mit der Methode der Magnetotellurik. Dipl.Arb. Inst. f. Angew. Geophys. Univ. München 1970.

KRAJEV, A.P. : Grundlagen der Geoelektrik. VEB Verlag Technik, Berlin 1957.

LATKA, R : Modellrechnungen zur Induktion im Erdinneren. Dipl. Arb. Inst. f. Angew. Geoph. Univ. München 1966.

LOSECKE, W. : Variometer für magnetotellurische Messungen. Diss. Naturw.-Philos. Fak. d. TH Braunschweig,1966.

MATSUSHITA, S., W.H.CAMPBELL : Physics of geomagnetic phenomena, Vol.I, Academic Press, New York u. London 1967.

PORSTENDORFER, G. : Tellurik, Grundlagen, Meßtechnik und neue Einsatzmöglichkeiten. Freiberger Forschungshefte C 107, Akademieverlag Berlin, 1961.

SCHUCH, M : Eigenpotentialbeobachtungen mit verschiedenen Elektroden, insbesondere an Torflagerstätten. Diss. Naturw. Fak. Univ. München, 1962.

SCHMUCKER, U. : Zwei neue Verfahren zur Bestimmung des erdelektrischen Widerstandes als Funktion der Tiefe aus erdmagnetischen und erdelektrischen Beobachtungen. Protok. Erdmagn. Tiefens. Reinhausen, S. 134-147,1969.

SENGPIEL, K.P. : Das induzierte erdelektrische Feld im süddeutschen Alpenvorland und seine Abhängigkeit vom Untergrund, untersucht mit neuen Methoden der Auswertung und Interpretation. Diss. Naturw. Fak. Univ. München 1968.

SCHULT, A., M.SCHOBER : Measurement of electrical conductivity of natural olivine at temperatures up to 950°C und pressures up to 42 kbar. Zeitschrift f. Geophys. 35, 1969, S. 105-112.

UNTIED, J. : Der äquatoriale Elektrojet - Stromsystem und Magnetfeld. Gamma 2, Inst.f. Geophys. T.U. Braunschweig, 1968.

REITMAYR, G. : Auswertung von Messungen des erdelektrischen und erdmagnetischen Feldes auf einem Profil quer über den Oberrheingraben. Dipl. Arb. Inst. f. Angew. Geophys. Univ. München, 1971.

KERTZ, W. : Statistik geophysikalischer Beobachtungsreihen. Institut für Geophysik und Meteorologie der TU Braunschweig, 1970.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinem verehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr. Gustav Angenheister, der die Arbeitsgruppe "Magnetotellurik" ins Leben gerufen und ständig gefördert hat und mir dabei die Möglichkeit gab, an seinem Institut und unter seiner Anleitung diese Arbeit anzufertigen.

Zu freundschaftlichem Dank verpflichtet bin ich den Mitgliedern der Arbeitsgruppe "Magnetotellurik", den Herren Dr. A. Berktold, Dr. V. Haak, M. Beblo und G. Reitmayr für die vielen fruchtbaren Diskussionen, für ihre tatkräftige Hilfe bei der Erprobung der Geräte und die Teilnahme an den Feldmessungen.

Herrn Prof. Dr. G. Hofmann und Herrn Dr. K. Wienert danke ich für die kritische Durchsicht der Arbeit, die verschiedene Verbesserungen ergab.

Die Feldmessungen und die numerischen Rechnungen auf der Rechenanlage des Leibniz-Rechenzentrums der Bayerischen Akademie der Wissenschaften wurden finanziell von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützt.

Lebenslauf

Siegfried Greinwald, geboren am 29. 5. 1939 in München als 1. Kind des Ingenieurs Jakob Greinwald und seiner Ehefrau Maria, geborene Ehrnthaller.

1945 - 1949 Besuch der Volksschule in Kelheim.

1949 - 1957 Besuch der Donauoberrealschule in Kelheim.

1957 - 1959 Besuch der Oberrealschule Deggendorf (Abitur 1959).

Okt. 1959 - Okt. 1960 Wehrdienst.

Nov. 1960 - Juli 1967 Studium der Geophysik an der Ludwig-Maximilians-Universität in München.
März 1964 Diplom-Vorprüfung im Fach Geophysik.
Juli 1967 Diplom-Hauptprüfung im Fach Geophysik.

Seit August 1967 wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Prof. Dr. G. Angenheister, unter dessen Anleitung ich diese Arbeit fertigte.